

PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE GENERADORES SÍNCRONOS USANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES

**CAROLINA MORENO LAVERDE
IVONNE PANIAGUA GOMEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA, 2010**

**PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE GENERADORES SÍNCRONOS
USANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES**

**CAROLINA MORENO LAVERDE
IVONNE PANIAGUA GOMEZ**

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Electricista**

**Director
M.Sc. RICARDO HINCAPIÉ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA, 2010**

*Este proyecto no se hubiera
hecho posible sin la ayuda de
Dios, el apoyo incondicional de
mi madre, familia y amigos.*

Carolina Moreno Laverde

*Este trabajo se realizó gracias
a Dios , a la memoria de mi
madre y a todos mis seres
queridos que me han
brindado su apoyo.*

Ivonne Paniagua Gómez

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Agradecimientos

Agradecemos de manera especial al M.Sc. Ricardo Alberto Hincapié, quien con su incondicional colaboración, orientación y motivación se logró cumplir con los objetivos propuestos para este proyecto.

Agradecemos al Dr. Juan José Mora por su oportuna colaboración y orientación para iniciar este proyecto lo cual fue de suma importancia.

Al Ing. Byron Ruiz Mondragón por compartirnos sus conocimientos y experiencias en el campo de investigación.

Al Ing. Harrison Murillo por su colaboración en el área de la programación, lo que fue muy útil para el desarrollo de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

LISTAS DE FIGURAS	ix
LISTAS DE TABLAS	x
INTRODUCCIÓN	1
1. GENERADOR SÍNCRONO	3
1.1 GENERALIDADES	3
1.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	4
1.3 MODELO CIRCUITAL	6
1.4 FUNCIONAMIENTO BAJO CONDICIONES DE CARGA	7
1.5 CONEXIÓN AL SISTEMA DE POTENCIA	7
1.5.1 Unidad generador-transformador (conexión unitaria)	7
1.5.2 Unidad generador-transformador con interruptor en el generador	8
1.5.3 Generadores compuestos en cruz	8
1.5.4 Conexión directa	9
1.6 MODELO DE CORTOCIRCUITO	10
1.6.1 Redes de secuencia	10
1.6.1.1 Secuencia positiva	10
1.6.1.2 Secuencia negativa	11
1.6.1.3 Secuencia cero	11
1.6.2 Disminución de la corriente de falla del generador	12
2. PROTECCIÓN CONVENCIONAL DE GENERADORES SÍNCRONOS	14
2.1 TIPOS DE PROTECCIONES DEL GENERADOR SÍNCRONO	14
2.1.1 Protección del estator	14
2.1.1.1 Protección diferencial para fallas entre fases	14
2.1.1.2 Protección convencional para fallas a tierra	16
2.1.1.3 Protección contra cortocircuitos entre espiras de igual fase y fases abiertas	20
2.1.1.4 Protección contra sobrecalentamiento del estator	21
2.1.1.5 Protección contra sobretensiones	21
2.1.2 Protección del rotor	21
2.1.2.1 Protección del devanado de campo contra cortocircuito a tierra	21
2.1.2.2 Protección para circuito abierto	24
2.1.2.3 Protección contra sobrecalentamiento del rotor	24
2.1.3 Otros tipos de protecciones	24
2.1.3.1 Protección contra sobrevelocidad	24
2.1.3.2 Protección contra vibración	24
2.1.3.3 Protección contra motorización	24
2.1.3.4. Protección contra pérdida de excitación	25
2.2 ATERRIZAJE DEL GENERADOR SÍNCRONO	25

2.2.1	Aterrizaje directo del neutro de la máquina a través de una resistencia	26
2.2.2	Aterrizaje directo del neutro de la máquina a través de una reactancia	26
2.2.3	Aterrizaje del neutro de la máquina mediante un transformador de distribución con baja resistencia a tierra en el secundario	27
2.2.4	Aterrizaje del neutro de la máquina mediante un transformador de distribución con baja reactancia inductiva a tierra en el secundario	27
2.2.5	Aterrizaje del generador desde sus terminales	28
3.	REDES NEURONALES ARTIFICIALES	30
3.1	NEURONA BIOLÓGICA	30
3.1.1	Funcionamiento de la neurona biológica	31
3.1.2	Aprendizaje de la neurona biológica	31
3.2	NEURONA ARTIFICIAL	32
3.2.1	Función de transferencia o salida	33
3.2.2	Estructura y características de una RNA	35
3.2.2.1	Niveles o capas de neuronas	35
3.2.2.2	Formas de conexión entre neuronas	36
3.2.2.3	Mecanismo de aprendizaje	36
3.3	RED BACKPROPAGATION	37
3.3.1	Funcionamiento de la red	37
3.3.2	Entrenamiento de la red	38
3.3.2.1	Propagación hacia adelante	38
3.3.2.2	Pasos para entrenar la red	40
3.3.3	Consideraciones sobre el algoritmo de aprendizaje	42
3.3.3.1	Dimensionamiento de la red	43
3.3.3.2	Inicialización de los pesos	44
3.3.3.3	Determinación de la función de transferencia	44
4.	APLICACIÓN DE RNA EN LA PROTECCIÓN DE GENERADORES SÍNCRONOS	45
4.1	MODELO BASADO EN EL TERCER ARMÓNICO	45
4.1.1	Componentes armónicas presentes en el neutro del generador	45
4.1.2	Esquema típico de conexión de una unidad generadora a la red	46
4.1.3	Modelo circuital equivalente del generador síncrono mediante voltajes y corrientes del tercer armónico	46
4.1.3.1	Modelo del generador síncrono en condiciones de operación normal	46
4.1.3.2	Modelo del generador síncrono en condiciones de operación bajo falla	49
4.1.3.3	Esquema de aterrizaje mediante alta resistencia de puesta a tierra	52
4.2	CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR SÍNCRONO SELECCIONADO	52
4.3	MODELO DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL	53
4.3.1	Protección diferencial en operación normal	54
4.3.2	Protección diferencial en operación bajo falla	54
4.4	METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS DATOS EMPLEADOS POR LA RNA	55

4.4.1	Determinación de la resistencia de aterrizaje	57
4.4.2	Determinación de la impedancia de fase y del neutro	57
4.4.3	Determinación de las corrientes de operación normal y bajo fallo	57
4.4.3.1	Modelo bajo condiciones normales de operación	57
4.4.3.2	Modelo bajo condiciones de falla	58
4.5	ARQUITECTURA DE LA RED NEURONAL	59
4.6	RESULTADOS OBTENIDOS	61
4.6.1	Caso de prueba 1	62
4.6.2	Caso de prueba 2	64
4.6.3	Caso de prueba 3	67
4.6.4	Caso de prueba 4	70
4.6.5	Caso de prueba 5	73
4.7	COMENTARIOS DE LOS CASOS DE PRUEBA	76
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
5.1	CONCLUSIONES	78
5.2	RECOMENDACIONES	79
	BIBLIOGRAFÍA	80
	ANEXO	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Sistema de potencia	3
Figura 1.2	Principio básico de la máquina síncrona	3
Figura 1.3	Campo magnético giratorio	4
Figura 1.4	Campo magnético giratorio para diferentes valores de θ	5
Figura 1.5	Circuito equivalente de un generador síncrono trifásico	6
Figura 1.6	Circuito equivalente monofásico del generador síncrono	6
Figura 1.7	Conexión unitaria	7
Figura 1.8	Unidad generador-transformador con interruptor en el generador	8
Figura 1.9	Generadores compuestos en cruz	9
Figura 1.10	Conexión directa	9
Figura 1.11	Red de secuencia positiva	10
Figura 1.12	Red de secuencia negativa	11
Figura 1.13	Red de secuencia cero	12
Figura 1.14	Disminución de la corriente de falla del generador	12
Figura 2.1	Relé diferencial de porcentaje variable	15
Figura 2.2	Conexión del relé diferencial de porcentaje de pendiente variable	15
Figura 2.3	Conexión del relé diferencial tipo producto 87N	16
Figura 2.4	Esquema de protección convencional de sobretensión	17
Figura 2.5	Comportamiento de las corrientes del tercer armónico	18
Figura 2.6	Esquema de protección del tercer armónico	19
Figura 2.7	Esquema de inyección de subarmónicos	20
Figura 2.8	Esquema de conexión del método potenciométrico	22
Figura 2.9	Método de inyección de corriente alterna	23
Figura 2.10	Método de inyección de corriente continua	23
Figura 2.11	Esquema de aterrizaje directo del neutro de la maquina a través de R	26
Figura 2.12	Aterrizaje directo del neutro de la maquina a través de L	26
Figura 2.13	Esquema de aterrizaje mediante un transformador de distribución con baja resistencia	27
Figura 2.14	Esquema de aterrizaje mediante un transformador de distribución con baja reactancia inductiva	27
Figura 2.15	Esquema de aterrizaje del generador desde sus terminales (Y- Δ)	28
Figura 2.16	Esquema de aterrizaje con resistencia media en los terminales del generador	28
Figura 2.17	Esquema de aterrizaje del generador desde sus terminales con conexión Zig-Zag	29
Figura 3.1	Neurona biológica y sus partes	31
Figura 3.2	Ley de Hebb	32
Figura 3.3	Regla de Ladislav-Kandel	32

Figura 3.4	Imitación de la neurona artificial	33
Figura 3.5	Función escalón	34
Figura 3.6	Función lineal-mixta	34
Figura 3.7	Función Sigmoidal	34
Figura 3.8	Función tangente hiperbólica	35
Figura 3.9	Estructura de una red neuronal típica	35
Figura 3.10	Representación típica de una forma de la superficie de error	42
Figura 4.1	Tensión del tercer armónico en condiciones normales de operación	45
Figura 4.2	Elementos que influyen en el modelo circuital del devanado estatórico	46
Figura 4.3	Modelo circuital del generador síncrono mediante voltajes del tercer armónico	47
Figura 4.4	Circuito equivalente del estator en condiciones normales de operación	47
Figura 4.5	Modelo circuital usando componentes de secuencia cero	48
Figura 4.6	Circuito reducido de secuencia cero	48
Figura 4.7	Modelo circuital equivalente del generador síncrono	50
Figura 4.8	Circuito reducido por el teorema de Millman	51
Figura 4.9	Circuito equivalente para calcular V_n y V_t	52
Figura 4.10	Protección diferencial	54
Figura 4.11	Falla interna	55
Figura 4.12	Modelo equivalente circuital del generador síncrono en operación normal	56
Figura 4.13	Modelo equivalente circuital del generador síncrono en operación bajo falla	56
Figura 4.14	Arquitectura de la red neuronal	60
Figura 4.15	Respuesta del caso 1 en operación normal	64
Figura 4.16	Respuesta del caso 1 en operación bajo falla	64
Figura 4.17	Respuesta del caso 2 en operación normal	67
Figura 4.18	Respuesta del caso 2 en operación bajo falla	67
Figura 4.19	Respuesta del caso 3 en operación normal	70
Figura 4.20	Respuesta del caso 3 en operación bajo falla	70
Figura 4.21	Respuesta del caso 4 en operación normal	73
Figura 4.22	Respuesta del caso 4 en operación bajo falla	73
Figura 4.23	Respuesta del caso 5 en operación normal	76
Figura 4.24	Respuesta del caso 5 en operación bajo falla	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Problema en un generador síncrono	14
Tabla 3.1	Clasificación de las RNA	37
Tabla 4.1	Características del generador síncrono seleccionado	53
Tabla 4.2	Parámetros y nomenclatura	58
Tabla 4.3	Parámetros y nomenclatura	59
Tabla 4.4	Características de la RNA	61
Tabla 4.5	Datos de las simulaciones para cada caso de prueba	61
Tabla 4.6	Respuesta del caso 1 en operación normal	62
Tabla 4.7	Respuesta del caso 1 en operación bajo falla	63
Tabla 4.8	Respuesta del caso 2 en operación normal	65
Tabla 4.9	Respuesta del caso 2 en operación bajo falla	66
Tabla 4.10	Respuesta del caso 3 en operación normal	68
Tabla 4.11	Respuesta del caso 3 en operación bajo falla	69
Tabla 4.12	Respuesta del caso 4 en operación normal	71
Tabla 4.13	Respuesta del caso 4 en operación bajo falla	72
Tabla 4.14	Respuesta del caso 5 en operación normal	74
Tabla 4.15	Respuesta del caso 5 en operación bajo falla	75
Tabla 4.16	Errores máximos de los casos de prueba	77
Tabla A1	Datos de entrenamiento para el caso 1 en operación normal	82
Tabla A2	Datos de entrenamiento para el caso 1 en operación bajo falla	85
Tabla A3	Datos de entrenamiento para el caso 2 en operación normal	87
Tabla A4	Datos de entrenamiento para el caso 2 en operación bajo falla	89
Tabla A5	Datos de entrenamiento para el caso 3 en operación normal	91
Tabla A6	Datos de entrenamiento para el caso 3 en operación bajo falla	93
Tabla A7	Datos de entrenamiento para el caso 4 en operación normal	95
Tabla A8	Datos de entrenamiento para el caso 4 en operación bajo falla	97
Tabla A9	Datos de entrenamiento para el caso 5 en operación normal	99
Tabla A10	Datos de entrenamiento para el caso 5 en operación bajo falla	101

INTRODUCCIÓN

Los generadores síncronos constituyen unos de los equipos más importantes en un sistema de potencia y están sujetos, a la vez, a más tipos de fallas que otros elementos. Las fallas en los generadores se consideran de gran importancia, ya que pueden producir fallos severos y costosos al aislamiento, devanados y núcleo; las fallas también pueden producir tensiones bruscas de torsión en los ejes y acoplamiento, ocasionando daños en estos elementos.

Para evitar los problemas ocasionados por las fallas que se presentan fuera y dentro del generador y que producen altas corrientes de cortocircuito, se requiere el uso de elementos de protección de alta velocidad que aíslen la máquina eléctrica de la red casi de forma instantánea y eviten, así, daños mayores. Uno de esos elementos es la protección diferencial, la cual se encarga de comparar los valores entrantes y salientes en cada fase del estator, para detectar fallas internas y disparar las protecciones en el momento de su ocurrencia.

Tradicionalmente, se han utilizado relés electromecánicos y de estado sólido como sistema de protección diferencial de los generadores síncronos. Sin embargo, dichos relés no protegen el cien por ciento del devanado del estator, pues no son eficientes en la detección de ocurrencia de fallas fase-tierra cercanas al neutro, ya que solo proporcionan una protección sensible para aproximadamente el noventa por ciento del devanado del estator; el porcentaje restante del devanado en cercanías del neutro, no hay suficiente tensión y corriente residual para que el relé entre en operación y menos aún cuando el generador está aterrizado mediante una alta impedancia.[1]

Debido a esto se han desarrollado unas técnicas para la detección de fallas a tierra que cubran el cien por ciento del devanado del estator. Estas pueden ser divididas en dos categorías: medición de tensión de tercer armónico y la inyección de tensión residual o de neutro.

El método del tercer armónico utiliza estas componentes medidas en las terminales y en el punto neutro de las máquinas y, mediante su comparación, garantiza protección total a los devanados. La tensión de tercer armónico varía de una máquina a otra, y es sustancialmente dependiente de las condiciones de operación del generador, como las variaciones de la capacitancia de los equipos conectados en terminales. La variación del tercer armónico permite tomar decisiones sobre donde medir y que estrategia de protección es la más adecuada.

El método de inyección de tensión detecta fallas a tierra aplicando una tensión entre el neutro y la tierra, a una frecuencia subarmónica determinada. La magnitud medida es la corriente resultante de la correspondiente tensión inyectada. Cuando ocurre una falla fase-tierra, la corriente resultante varía incrementando su valor, lo que causa la actuación de las protecciones.

Adicionalmente a estas técnicas de protección, en los últimos años han evolucionado metodologías basadas en inteligencia artificial y sistemas expertos como la lógica difusa y las redes neuronales artificiales, los cuales necesitan una base de datos que describan el funcionamiento del sistema, para que a partir de esta, se logre realizar un análisis lógico para el control del sistema y facilitar la toma de decisiones.

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) han sido introducidas en la protección de transformadores y motores con un mejoramiento apreciable en el diagnóstico de las fallas. Las RNA, también, han sido empleadas en la detección de las fallas internas en el devanado del generador síncrono. En el caso de la detección de fallas en el devanado del estator, la RNA es entrenada a partir de las mediciones de las corrientes obtenidas en la parte del neutro y de los terminales del generador, mediante simulaciones y/o en el laboratorio. La detección por medio de una RNA se caracteriza por tener una alta sensibilidad en la discriminación de fallas.

Con el fin de mejorar la protección del devanado del estator ante fallas fase-tierra cercanas al punto del neutro, se presenta en este trabajo una metodología basada en redes neuronales artificiales debido a que son bastantes eficientes en problemas de clasificación [1], a partir de un reconocimiento de patrones generados a través del entrenamiento de la red, utilizando como información el componente de tercer armónico de la corriente diferencial. El esquema circuital empleado para implementar la RNA está basado en las componentes del tercer armónico, ya que por medio de este se pueden detectar las fallas a tierra en los puntos más cercanos al neutro, y además por su característica lineal, hace más fácil el estudio de las fallas internas del generador.

El contenido de este proyecto se presenta de la siguiente manera:

En el primer capítulo se ilustra el funcionamiento, comportamiento y conexión del generador síncrono en el sistema de potencia eléctrico, así como su modelamiento bajo condiciones de cortocircuito.

En el siguiente capítulo se presentan los diferentes tipos de protecciones empleadas para proteger el generador síncrono, así como los esquemas más comunes de protección diferencial y los diversos tipos de aterrizaje.

En el tercer capítulo se ilustran los fundamentos básicos de las redes neuronales, sus características y aplicaciones.

En el siguiente capítulo se presenta la implementación de las RNA en la protección del generador síncrono, ante distintas condiciones de operación a las que está sujeto este elemento.

Finalmente en el capítulo cinco se presentan las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

1. GENERADOR SÍNCRONO

1.1 GENERALIDADES

Los generadores síncronos son unos dispositivos electromecánicos que pueden transformar energía mecánica en eléctrica (y viceversa). Por lo general, estos elementos tienen un rango de capacidad típico que está entre los 20 MVA y 1200 MVA. Están localizados en plantas generadoras que pueden contener uno o más de estas unidades [2].

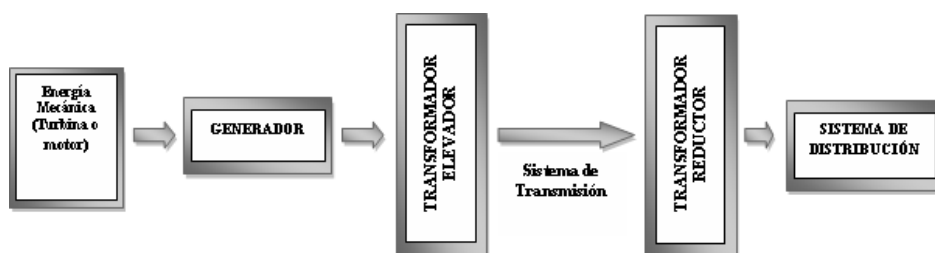


Figura 1.1 Sistema de potencia

Las máquinas síncronas pueden ser motores y generadores cuya corriente de campo las suministra una fuente externa de potencia de corriente continua (dc). Las máquinas de corriente alterna (ac) se diferencian de las de dc en que los embobinados del inducido están siempre localizados en el estator, mientras que los embobinados de campo están localizados en el rotor. El campo magnético giratorio originado en los embobinados de campo de una máquina de ac induce un sistema trifásico de voltajes en los embobinados del inducido localizados en el estator. A la inversa, un conjunto trifásico de corriente en los embobinados del inducido en el estator, produce un campo magnético giratorio que interactúa con el campo magnético del rotor, produciendo un momento de torsión en la máquina. Estos dos efectos son la inversión de la máquina de ac, donde puede actuar como generador y como motor, tal como se muestra en la figura 1.2 [3].

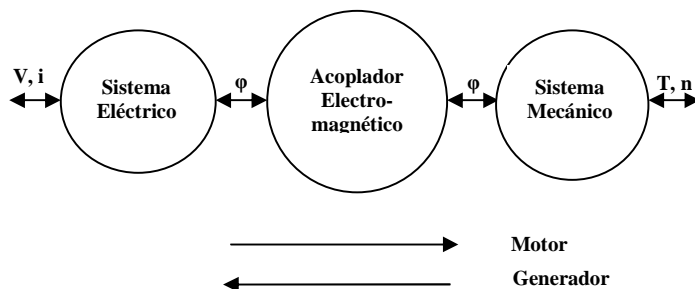


Figura 1.2 Principio básico de la máquina síncrona

1.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio básico de funcionamiento del generador síncrono consiste en que si un sistema trifásico de corrientes, todas de igual magnitud y desfasadas 120° , fluye en un embobinado trifásico, se produce un campo magnético giratorio de magnitud constante. El embobinado trifásico consta de tres embobinados separados que se encuentran espaciados 120° eléctricos entre ellos.

El concepto de campo magnético giratorio se ilustra, en el caso más sencillo, mediante un estator vacío que contienen tres bobinas, separadas 120° como se muestra en la siguiente figura.

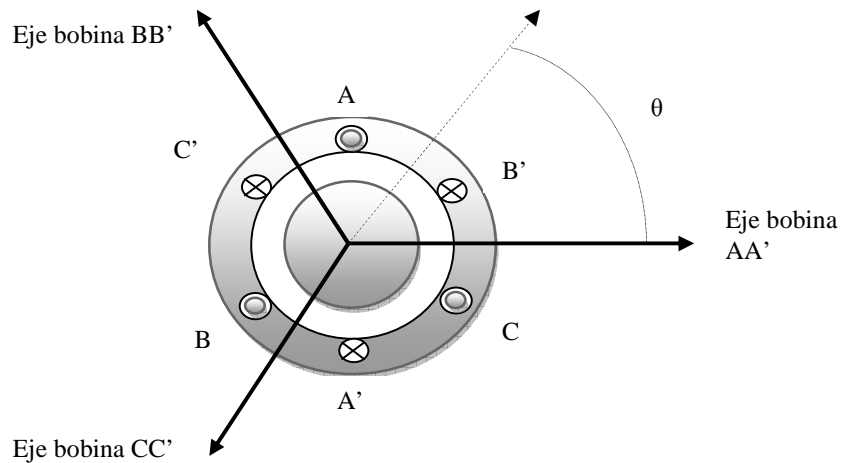


Figura 1.3 Campo magnético giratorio

Las corrientes que circulan por el estator en un determinado instante de tiempo, se pueden describir por la siguiente expresión:

$$I_a(t) = i_m \cos(\omega t) \quad (1.1)$$

$$I_b(t) = i_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (1.2)$$

$$I_c(t) = i_m \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (1.3)$$

Donde i_a , i_b e i_c son las corrientes por las fases y ω es igual a dos veces la frecuencia multiplicada por π ($2\pi f$).

El campo magnético en el estator producido por dichas corrientes es giratorio y su velocidad de rotación es la síncrona (es decir que sólo pueden producir por promedio

diferente de cero cuando la velocidad mecánica coincide con la velocidad angular de las corrientes inyectadas en el estator), al igual que el campo magnético giratorio del rotor, ya que ambos giran en la misma dirección y velocidad, manteniendo un desfase espacial constante entre sí, permitiendo así una interacción entre ellos [3].

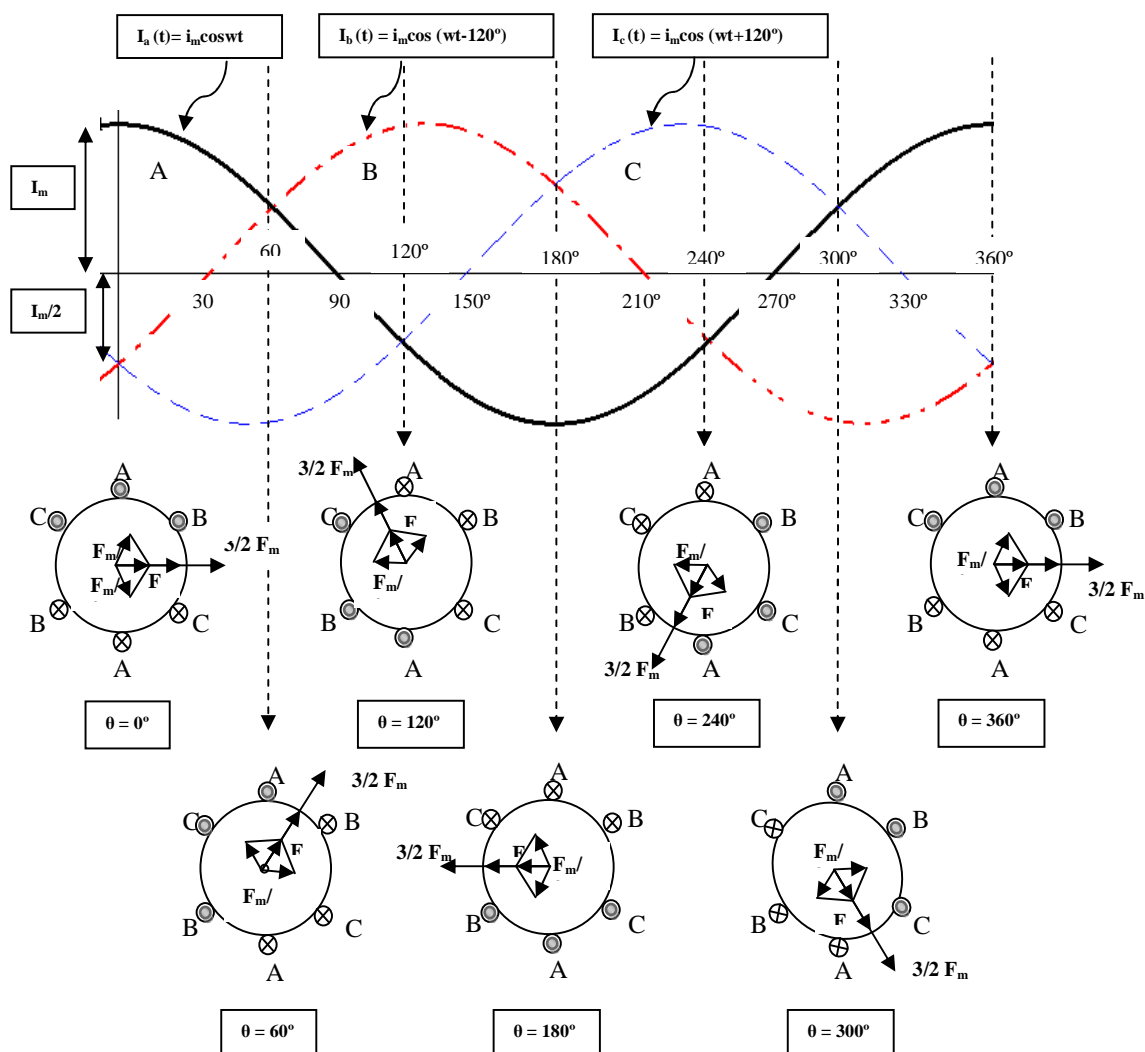


Figura 1.4 Campo magnético giratorio para diferentes valores de θ

En la figura anterior se puede apreciar la distribución del embobinado y sus campos magnéticos representados por los vectores F_m , en los cuales se puede observar que aunque la dirección del campo magnético cambia, la magnitud es constante.

1.3 MODELO CIRCUITAL

Cada una de las fases se puede representar como se muestra en la figura 1.5, en donde se ilustra la fuente de potencia de dc (V_f) alimentando el circuito de campo del rotor representada por la inductancia de la bobina L_f y su resistencia en serie R_f . Este circuito también contiene una resistencia variable en serie R_{aj} , que controla el flujo de corriente de campo. El resto del circuito es la representación por fase del devanado del estator, el cual contiene un voltaje generado E_a internamente con una inductancia en serie X_s (suma de la reactancia del inducido y autoinductancia de la bobina) y una resistencia R_a . Los voltajes V_ϕ y las corrientes están desfasados 120° .

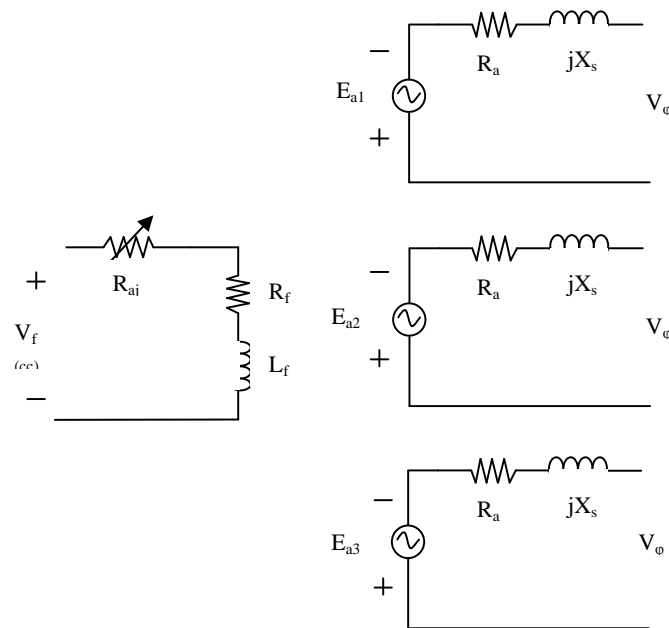


Figura 1.5 Circuito equivalente de un generador síncrono trifásico

La máquina síncrona se puede representar por medio del circuito equivalente monofásico de la figura 1.6, siempre y cuando las tres fases tengan las mismas tensiones y corrientes cuando las cargas están balanceadas.

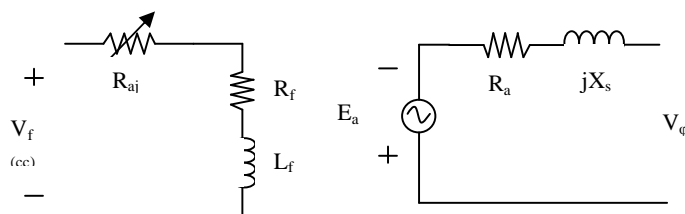


Figura 1.6. Circuito equivalente monofásico del generador síncrono

1.4 FUNCIONAMIENTO BAJO CONDICIONES DE CARGA

El comportamiento de un generador síncrono bajo carga, varía enormemente, dependiendo del factor de potencia de la carga y si el generador está funcionando solo o en paralelo con otro generador [3].

Un incremento en la carga es un incremento en la potencia real o reactiva que sale del generador. Tal aumento de carga, incrementa la corriente de carga obtenida del generador. Dependiendo del tipo de carga que se conecta al generador, se presentan diversas situaciones. Estas son:

- Si la carga es inductiva de potencia reactiva, el voltaje de fase y de línea en terminales de la máquina disminuye significativamente.
- Si la carga es con factor de potencia unitario, hay una ligera disminución en el voltaje de fase y línea en los terminales.
- Si la carga es reactiva capacitiva, el voltaje de fase y línea en los terminales se eleva.

1.5 CONEXIÓN AL SISTEMA DE POTENCIA

Existen métodos estandarizados para la conexión del generador al sistema de potencia. Estos son:

1.5.1 Unidad generador-transformador (conexión unitaria)

La figura 1.7 muestra el diagrama unifilar para un generador en conexión unitaria. El generador es conectado al sistema de potencia a través de un transformador elevador dedicado. La carga auxiliar del generador es suministrada desde un transformador reductor conectado a las terminales del generador. La mayoría de los generadores grandes son conectados al sistema de potencia de esta manera, usando un transformador elevador principal con conexión estrella-delta (Y- Δ). Al tener la generación conectada a un sistema delta, las corrientes de falla a tierra pueden ser reducidas usando una puesta a tierra de alta impedancia [4].

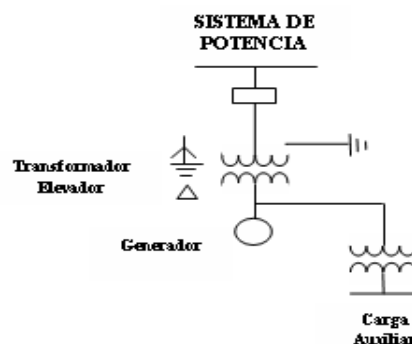


Figura 1.7 Conexión unitaria

1.5.2 Unidad generador-transformador con interruptor en el generador

Este tipo de conexión ha sido usado en algunos generadores de gran capacidad. El generador está conectado en estrella y la alta resistencia se encuentra aterrizada en el secundario del transformador de distribución. Dos transformadores auxiliares conectados en Dy con sus respectivas resistencias de aterrizaje, son usados para conectar el generador al sistema como se muestra en la figura 1.8. Los beneficios de esta configuración son la rápida evacuación de las fallas del generador y de los transformadores auxiliares [4].

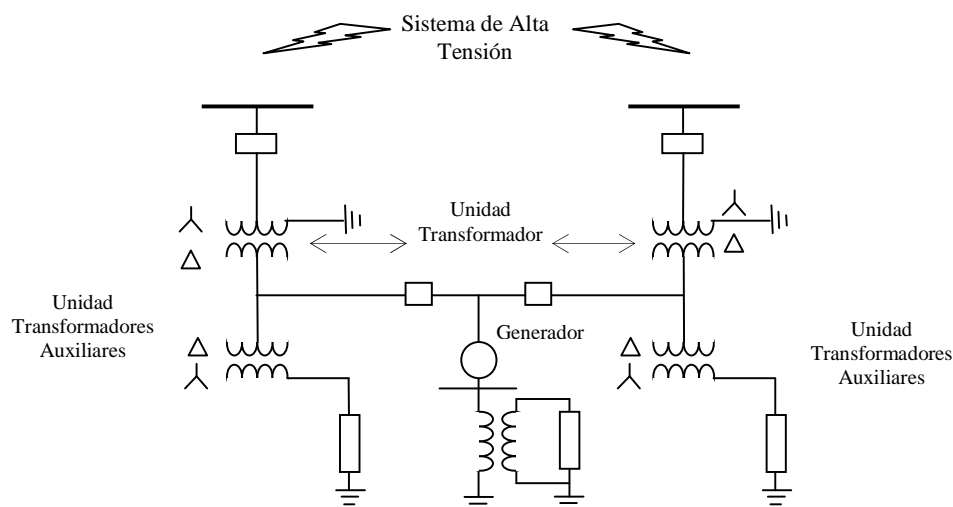


Figura 1.8 Unidad generador-transformador con interruptor en el generador

1.5.3 Generadores compuestos en cruz

Un método común para conectar los generadores compuestos en cruz al sistema es mostrado en la figura 1.9. Las unidades de alta presión (AP) y baja presión (BP) son ocupadas por el generador de voltaje y conectadas al sistema por medio de una unidad transformadora Dy aterrizada. Ambas unidades son usualmente conectadas en Y y esta práctica es recomendada solamente para uno de los neutros [4]. El aterrizaje de alta resistencia con el transformador de distribución es comúnmente usada.

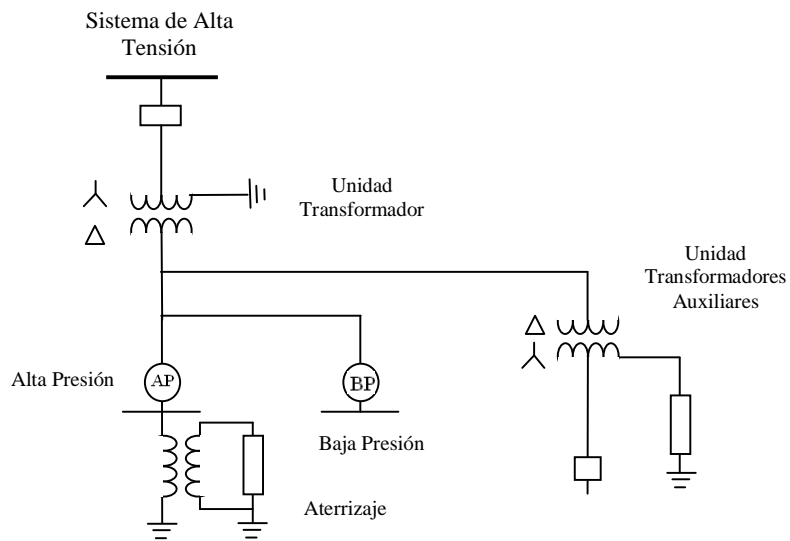


Figura 1.9 Generadores compuestos en cruz

1.5.4 Conexión directa

En la figura 1.10 se muestra el diagrama unifilar para una conexión directa de un generador a un sistema de potencia. Los generadores son conectados directamente al bus de carga sin transformación de tensión en el medio. Este tipo de conexión es un método recientemente usado en la industria para la conexión de generadores de tamaño pequeño [4].

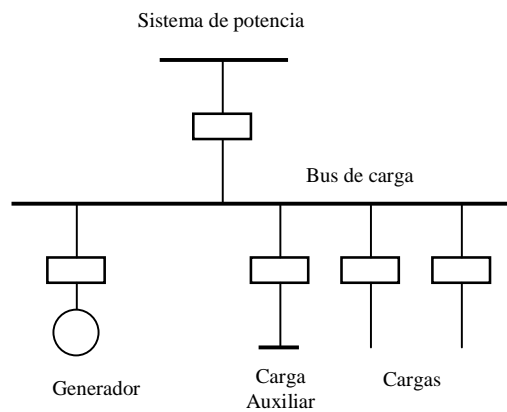


Figura 1.10 Conexión directa

1.6 MODELO DE CORTOCIRCUITO

El circuito eléctrico equivalente de un generador síncrono es una tensión interna en serie con una impedancia. La componente de resistencia de la impedancia del generador es pequeña comparada con la reactancia y es usualmente despreciada para cálculos de corriente de falla. Las figuras 1.11, 1.12 y 1.13 muestran la representación de componentes simétricas de un generador. El análisis de estas componentes es una herramienta matemática importante para calcular las corrientes y tensiones del generador bajo condiciones de desbalance [5].

1.6.1 Redes de secuencia

A continuación se presenta el modelo de la máquina síncrona bajo condiciones de cortocircuito para las diferentes redes de secuencia.

1.6.1.1 Secuencia positiva

En este esquema se usan tres valores diferentes de reactancia de secuencia positiva. En el circuito equivalente de secuencia positiva, X''_d es la reactancia subtransitoria, X'_d es la reactancia transitoria y X_d es la reactancia del generador en eje directo (figura 1.11). Todos estos valores de eje directo son necesarios para calcular los valores de corriente de cortocircuito en diferentes tiempos después de ocurrido el fallo. Estos valores son proporcionados por el fabricante del generador como parte de la hoja de datos de prueba del generador.

Puesto que el valor de la reactancia subtransitoria produce el valor de corriente inicial mayor, es generalmente usado en cálculos de cortocircuito para aplicación de relés. El valor de reactancia transitoria es usado para consideraciones de estabilidad. Los valores de reactancia no saturada son usados para calcular las corrientes de falla debido a que la tensión se reduce por debajo de la saturación durante fallas cercanas a la unidad. Puesto que los generadores típicos son operados ligeramente saturados, la corriente de falla sostenida (estado estable), será menor que la corriente de carga máxima, a menos que los reguladores de tensión refuerzen el campo durante una falla sostenida [2].

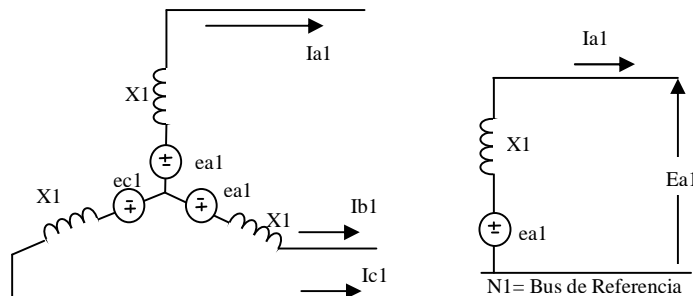


Figura 1.11 Red de secuencia positiva

1.6.1.2 Secuencia negativa

El flujo de corriente de secuencia negativa es de rotación de fase opuesta a través de la máquina y aparece como una componente de doble frecuencia en el rotor. El promedio de la reactancia subtransitoria de eje directo bajo los polos y entre los polos da una buena aproximación de la reactancia de secuencia negativa.

En una máquina de polos salientes, la secuencia negativa es el promedio de la reactancia subtransitoria de eje directo y en cuadratura, como se presenta en la siguiente expresión [2]:

$$X_2 = \frac{(X_d'' + X_q'')}{2} \quad (1.4)$$

Sin embargo en una máquina con rotor cilíndrico, se tiene que:

$$X_2 = X_d'' \quad (1.5)$$

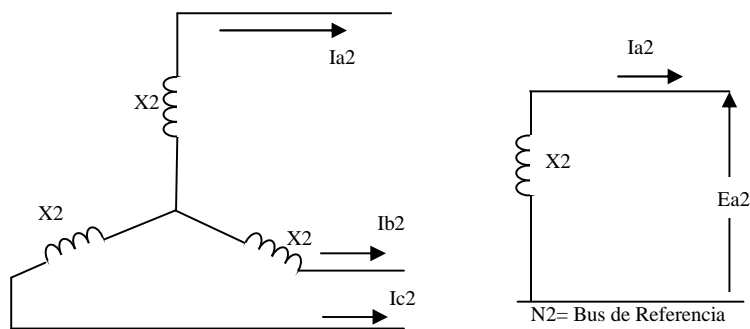


Figura 1.12 Red de secuencia negativa

1.6.1.3 Secuencia cero

La reactancia de secuencia cero es menor que los valores de secuencia positiva y negativa. Debido a los altos valores de corriente de falla a tierra disponibles para una máquina sólidamente puesta a tierra, una impedancia (reactancia o resistencia) es casi siempre insertada en la trayectoria de puesta a tierra del neutro, excepto en generadores muy pequeños donde el costo de proporcionar tales puestas a tierra en relación a los costos de la máquina son significativos. El esquema se observa en la figura 1.13 [2].

La resistencia del devanado del estator es generalmente lo suficientemente pequeña para ser despreciada en los cálculos de cortocircuito. Esta resistencia, sin embargo, es importante en la determinación de las constantes de tiempo de corriente directa de una corriente de

cortocircuito asimétrica. Para calcular fallas o condiciones de generación anormales desbalanceadas, las redes de secuencia positiva, negativa y cero son interconectadas [2].

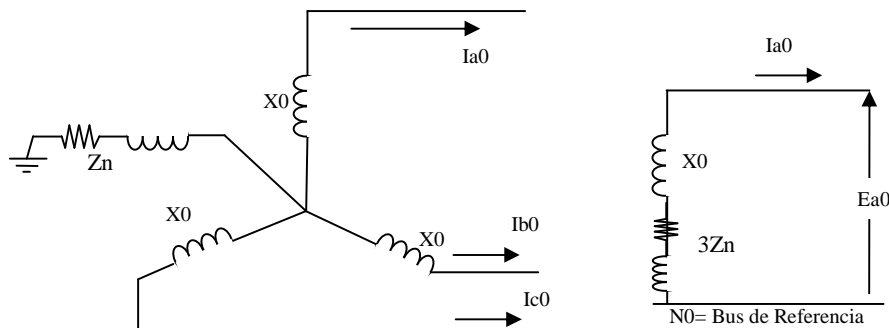


Figura 1.13 Red de secuencia cero

1.6.2 Disminución de la corriente de falla del generador

Debido a que la secuencia positiva del generador es caracterizada por tres reactancias con valores que se incrementan con el tiempo, sus corrientes de falla se comportan de manera inversa. La figura 1.14 [6] ilustra un trazo simétrico monofásico (ausencia de la componente dc) de una forma de onda de cortocircuito trifásico la cual puede ser dividida en tres periodos o regiones de tiempo [7].

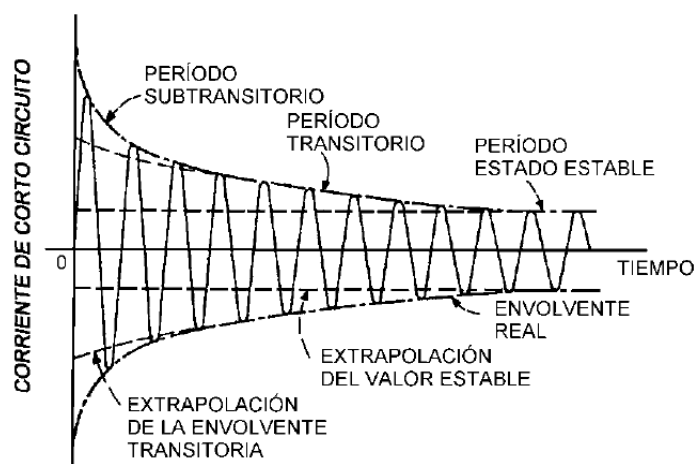


Figura 1.14 Disminución de la corriente de falla del generador

Los periodos descritos en la figura anterior son:

- Período subtransitorio. Se mantiene por pocos ciclos durante los cuales la magnitud de corriente es determinada por la reactancia subtransitoria del generador (X''_d) y el decremento del tiempo por la constante de tiempo T''_d .
- Período transitorio. Cubre un tiempo relativamente largo durante el cual la magnitud de corriente está determinada por la reactancia transitoria del generador (X'_d) y el decremento del tiempo por la constante de tiempo T'_d .
- Período de estado estable. Es el nivel de tiempo más largo de corriente de falla del generador, cuya magnitud es determinada por la reactancia de eje directo del generador (X_d).

2. PROTECCIÓN CONVENCIONAL DE GENERADORES SÍNCRONOS

El sistema de protecciones de un generador síncrono se diseña de acuerdo a su capacidad, tamaño e importancia dentro del sistema de potencia. Para cada problema que presenta el generador hay un dispositivo de protección que se encarga de evitar los daños o percances que pueden provocar la salida de operación de este.

En la siguiente tabla se muestra la localización y los tipos de problemas que puede presentar un generador síncrono.

Tabla 2.1 Problema en un generador síncrono

LOCALIZACIÓN	TIPO DE PROBLEMA
Devanado estatórico	Falla entre fases
	Falla a tierra
	Falla entre espiras
	Circuito abierto
	Sobrecalentamiento
	Sobretensiones
Devanado de campo	Aterrizamiento de los devanados
	Devanados de campo abiertos
	Sobrecalentamiento
Otros sistemas	Sobrevelocidades
	Vibraciones
	Motorización
	Pérdida de excitación

2.1 TIPOS DE PROTECCIONES DEL GENERADOR SÍNCRONO

A continuación se presentan los diferentes tipos de protección convencionales para los problemas más comunes que se presentan en el generador.

2.1.1 Protección del estator

2.1.1.1 Protección diferencial para fallas entre fases

Una falla de fase en el devanado del estator del generador es siempre considerada como seria debido a las altas corrientes encontradas y el daño potencial a los devanados de la máquina, así como a las flechas y el acoplamiento. Por lo tanto, es muy importante minimizar el daño debido a fallas en el estator. Para agravar esta situación, la corriente de

falla en un generador no se interrumpe cuando el campo del generador es disparado y el generador es separado del sistema. La energía almacenada en el campo continúa alimentando la corriente de falla por varios segundos.

Un método estándar para este tipo de fallas es la protección diferencial y comúnmente se encuentra en unidades generadoras de 1 MVA en adelante. Para este tipo de generadores se utiliza el esquema de protección diferencial de porcentaje variable como se muestran en las figuras 2.1 y 2.2 [11].

Estos relés se identifican internacionalmente por el número 87 [8]. En estos elementos la pendiente puede variar desde 5% a 50%. Un relé de porcentaje fijo está normalmente entre el 10 y el 25%. Los transformadores de corriente usados en un esquema de relé diferencial deben tener preferentemente las mismas características; sin embargo, la protección diferencial de porcentaje variable es generalmente más tolerante a errores de transformadores de corriente con altas corrientes. Debe notarse que usar la misma precisión normalizada no garantiza obtener las mismas características reales; las características reales deben, por lo tanto, ser verificadas.

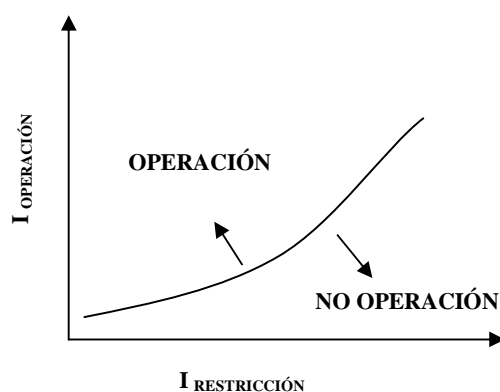


Figura 2.1 Relé diferencial de porcentaje variable

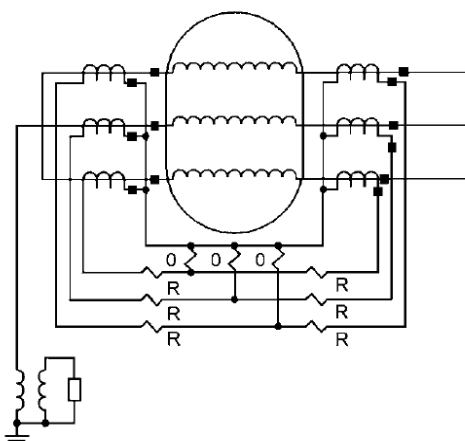


Figura 2.2 Conexión del relé diferencial de porcentaje de pendiente variable

usado para esta función está diseñado para ser sensible a una tensión de frecuencia fundamental e insensible a una tensión de tercer armónico y a otras tensiones armónicas de secuencia cero, que están presentes en el neutro del generador [9].

Puesto que la impedancia de puesta a tierra es grande comparada con la impedancia del generador y otras impedancias en el circuito, la tensión total fase-neutro es vista a través del dispositivo de puesta a tierra con una falla fase tierra en las terminales del generador. La tensión en el relé es función de la relación del transformador de distribución y del lugar de la falla. La tensión es máxima para una falla en terminales y disminuye en magnitud a medida que la falla se mueve de los terminales del generador hacia el neutro. Típicamente, el relé de sobretensión tiene un ajuste de pickup mínimo de aproximadamente 5 V.

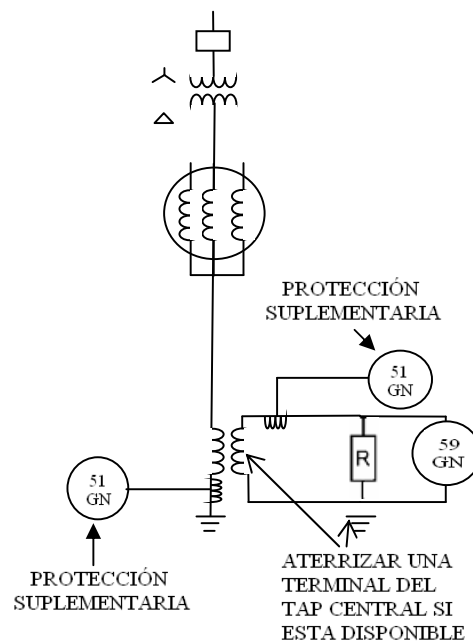


Figura 2.4 Esquema de protección convencional de sobretensión

- c. **Protección convencional del 100%.** La protección convencional para detección de falla a tierra del estator en sistemas puestos a tierra con alta impedancia es adecuada, pero sólo proporciona protección sensible para únicamente alrededor del 90% del estator. Esto es debido a que la falla en el porcentaje restante del devanado, cerca del neutro, no causa suficiente tensión y corriente residual de 60 Hz para operar a estos relés [9]. Es importante proteger todo el generador con un sistema de protección de falla a tierra adicional de tal forma que se cubra el 100% del devanado. Las técnicas para la detección de fallas a tierra que cubran el 100% del devanado del estator pueden ser divididas en dos categorías: técnica basada en tensión de tercer armónico e inyección de tensión residual o de neutro.

- **Técnica basada en tensión de tercer armónico.** Las componentes de tensión de tercera armónica están presentes en las terminales de casi todas las máquinas en diferentes grados; se presentan y varían debido a las diferencias en el diseño y fabricación. Si están presentes en cantidad suficiente, estas tensiones son usadas por los esquemas de esta categoría para detectar fallas a tierra cerca del neutro. Las tensiones de tercera armónica medidas en el neutro, en terminales del generador, o en ambos, son usadas para proporcionar protección [9] (figura 2.5).

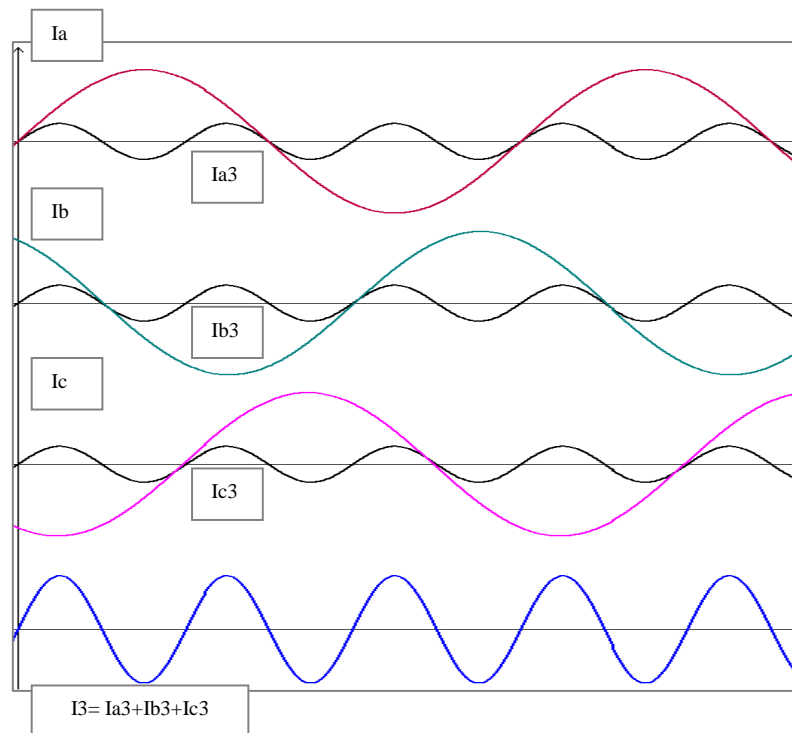


Figura 2.5 Comportamiento de las corrientes del tercer armónico

Las corrientes de tercer armónico en el generador se encuentran en fase y sus resultantes es el triple del valor del armónico (fundamental). Esta corriente pasa por el neutro y puede producir un disparo inesperado si el relé no incorpora un filtro que elimine el tercer armónico. En caso de falla externa, circula una corriente por el esquema diferencial (para una protección convencional), y la tensión en bornes del relé es reducida. En el supuesto de falla interna, no puede establecerse esta circulación de corriente y aparece una tensión elevada en bornes del relé de tensión. Este sistema no se ve afectado por el tercer armónico, las corrientes armónicas recorren de igual modo todos los transformadores de medida [9].

Todos estos sistemas adolecen del mismo defecto. Si la falla es muy próxima al punto del neutro, es muy posible que la protección no detecte el desequilibrio de tensión o corriente producida. Si se quiere proteger el 100% de estator hay que buscar relés y

sistemas más complejos. Uno de estos sistemas consiste precisamente en trabajar con el tercer armónico.

Cuando se produce un contacto a tierra del estator, la corriente del tercer armónico en el neutro, será tanto menor cuanto más cerca del neutro se produzca el contacto. En la figura 2.6 [9] se muestra el esquema de protección del 100% del devanado del estator basado en el tercer armónico.

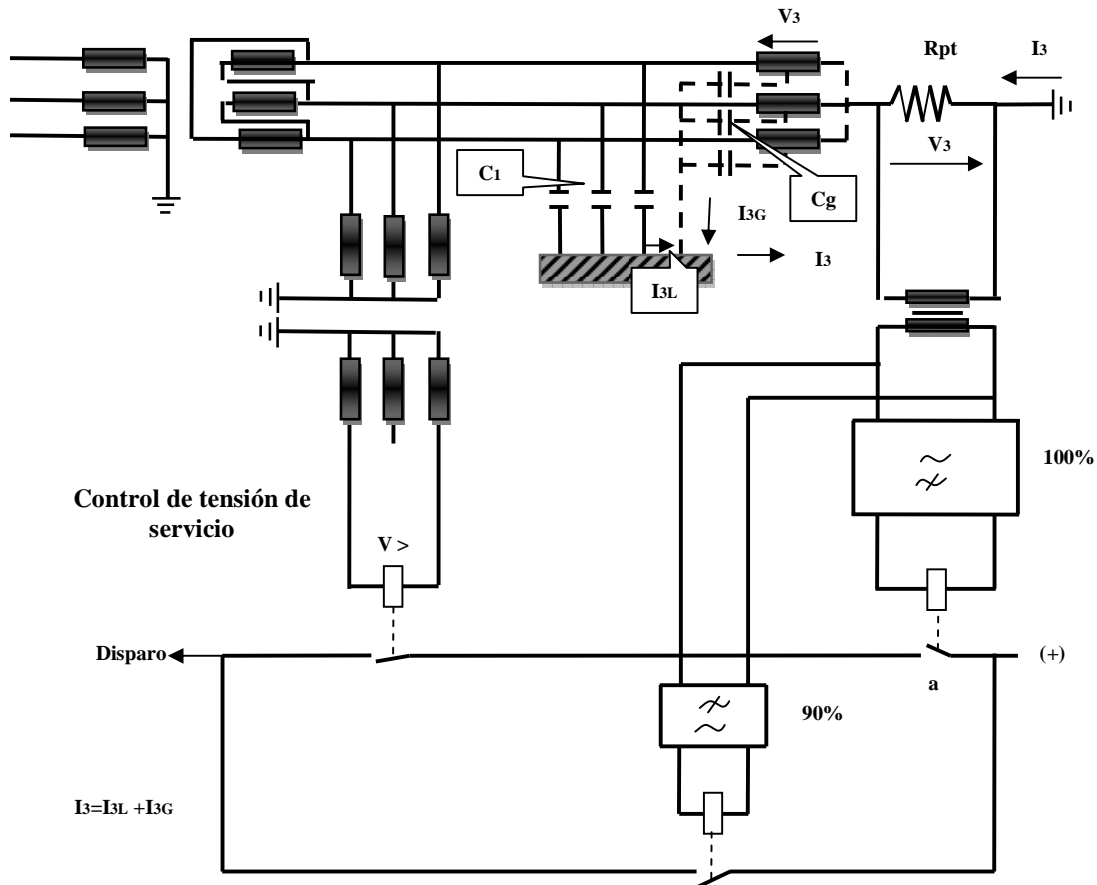


Figura 2.6 Esquema de protección del tercer armónico

Por el neutro del generador circula la corriente del tercer armónico I_3 , que produce un voltaje de tercer armónico en la resistencia de puesta a tierra R_{pt} . El relé de mínima tensión que cubre el 100% del estator, dispone de un filtro que refuerza la tensión del tercer armónico. En cambio el relé de máxima tensión, que cubre el 90%, dispone del filtro de rechazo del tercer armónico. En condiciones normales, el contenido del tercer armónico mantiene abierto el contacto a. Para que se produzca el disparo es necesario que la tensión sea la de servicio, pues esto evita el disparo cuando la máquina esté parada o cuando esté regulando la velocidad.

- **Inyección de tensión residual o de neutro.** Otro sistema más sofisticado consiste en la inyección de subarmónicos en la puesta a tierra del neutro [10]. Normalmente se trata de una tensión con una frecuencia distinta de la fundamental y que no coincida con ningún subarmónico. En condiciones normales, mientras no exista un contacto a tierra, apenas circula corriente de esta frecuencia. Solo en caso de contacto a tierra se cierra el circuito.

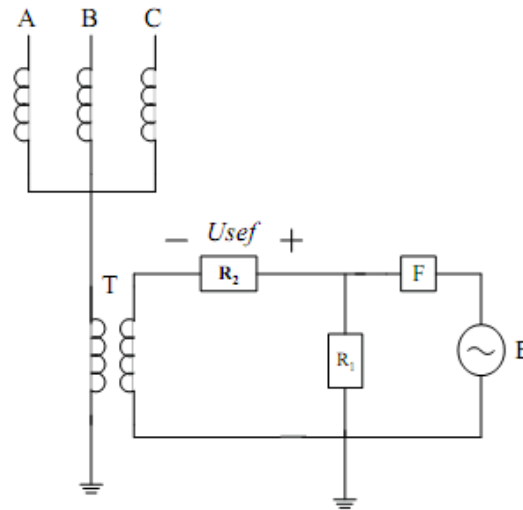


Figura 2.7 Esquema de inyección de subarmónicos

El esquema de inyección divide la resistencia de puesta a tierra en dos resistencias (R_1 y R_2), normalmente con una relación $N_1:N_2$. En la resistencia de menor valor (R_1) se inyecta la señal y en la resistencia de mayor valor (R_2), se mide la tensión correspondiente a la frecuencia de inyección (normalmente un cuarto de la frecuencia fundamental).

2.1.1.3 Protección contra cortocircuitos entre espiras de igual fase y fases abiertas

Un cortocircuito entre espiras de una misma fase debe ser localizado y el generador desconectado del sistema, debido a que puede convertirse con facilidad en un cortocircuito de fase a tierra comprometiendo el núcleo del estator. Esta clase de cortocircuito no surge en grandes generadores que poseen una vuelta por fase por ranura; además, no pueden ser detectados a través de la protección diferencial longitudinal, debido a que ésta se basa en el principio de comparación serie, y en este caso, por ser una perturbación serie no existe diferencia entre la corriente que circula por el comienzo de la fase y la que circula por el final.

El sistema de protección que se aplica para esta clase de cortocircuito depende de la disposición constructiva del generador. La protección difiere en el caso de un generador con dos enrollados por fase o con un solo enrollado por fase [7].

2.1.1.4 Protección contra sobrecalentamiento del estator

Las principales causas del sobrecalentamiento del estator de un generador radican en:

- Desperfecto en el sistema de refrigeración.
- Sobrecarga.
- Cortocircuito de varias láminas del estator.

Es usual la protección contra sobrecalentamientos del estator mediante relés del tipo imagen térmica diseñados para reproducir las condiciones de calentamiento que originan las corrientes estatóricas y que al llegar a una cierta temperatura de ajuste cierra sus contactos. Esta protección cuenta con la desventaja de solamente operar para sobrecalentamientos originados por una sobrecarga y no protege contra los sobrecalentamientos producidos por desperfectos en el sistema de refrigeración o por cortocircuitos de las láminas del estator [7].

2.1.1.5 Protección contra sobretensiones

La sobre velocidad originada por pérdidas de carga o desperfectos en el regulador de tensión producen sobretensiones. Toda sobretensión asociada con una sobrevelocidad es controlada por un regulador automático de tensión. No obstante, en las unidades hidráulicas, el flujo de agua no puede ser interrumpido o deflectado tan rápidamente y puede originarse una sobrevelocidad. En el caso de que la excitatriz se encuentre acoplada directamente a la máquina, la tensión tiende a crecer casi con el cuadrado de la velocidad. Como consecuencia, suele instalarse una protección de sobretensión en generadores accionados por turbinas hidráulicas y también por turbinas de gas, pero no con turbinas a vapor [7].

2.1.2 Protección del rotor

2.1.2.1 Protección del devanado de campo contra cortocircuitos a tierra

Debido a que los circuitos de campo operan desconectados de tierra, un cortocircuito o contacto a tierra no ocasiona ningún daño ni afecta la operación del generador. No obstante, la existencia de un cortocircuito a tierra incrementa la tensión a tierra en otros puntos del enrollado de campo cuando se inducen en éste tensiones debido a fenómenos transitorios en el estator. Como consecuencia, aumenta la probabilidad que ocurra un segundo cortocircuito a tierra. Si ocurre un segundo cortocircuito a tierra, parte del enrollado de campo estará cortocircuitado y la corriente en el resto se incrementará [7]. Al cortocircuitarse parte del enrollado, debido a los dos cortocircuitos a tierra, se produce un

desequilibrio del flujo en el entrehierro y esto origina un desequilibrio en las fuerzas magnéticas en ambos lados del rotor. Dicho desequilibrio puede ser lo suficientemente grande como para torcer el eje del rotor y hacerlo excéntrico, ocasionando vibraciones causantes de la rotura de descansos de pedestal, lo que origina que el rotor raspe contra el estator. Esta clase de falla origina daños muy extensos y costosos de reparar y capaces de dejar las máquinas fuera de servicio por períodos muy largos.

A continuación se muestran los métodos de protección más comunes ante este tipo de falla:

- a. **Método potenciométrico.** Este sistema abarca una resistencia con una derivación central, la que se conecta en paralelo con el enrollado principal del campo. La derivación central de la resistencia se conecta a tierra mediante un relé de sobretensión. Todo cortocircuito a tierra en el enrollado del campo originará una tensión mediante los terminales del relé. Dicha tensión es máxima para cortocircuitos que ocurran en los extremos del enrollado del campo, y se reduce a cero para cortocircuitos en el centro del enrollado (figura 2.8).

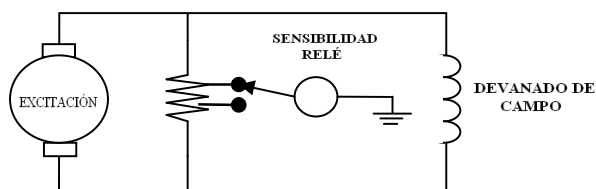


Figura 2.8 Esquema de conexión del método potenciométrico

La desventaja de este sistema radica en que exista una zona de insensibilidad para cortocircuitos en el centro del enrollado de campo. Para conseguir detectar un cortocircuito en esta posición, se suele desplazar la derivación central mediante una botonera o interruptor.

- b. **Método de inyección de corriente alterna.** Este sistema abarca un transformador de fuente auxiliar de corriente alterna y su funcionamiento implica que un extremo del primario de este transformador se conecta a tierra y en el otro extremo se conecta un relé de sobretensión y un condensador en serie a uno de los extremos del enrollado principal de campo. Al tener lugar un cortocircuito a tierra el circuito del relé se completa, siendo la corriente a través del relé independiente de la tensión de la excitatriz y solamente una función de la resistencia en el punto del cortocircuito (figura 2.9).

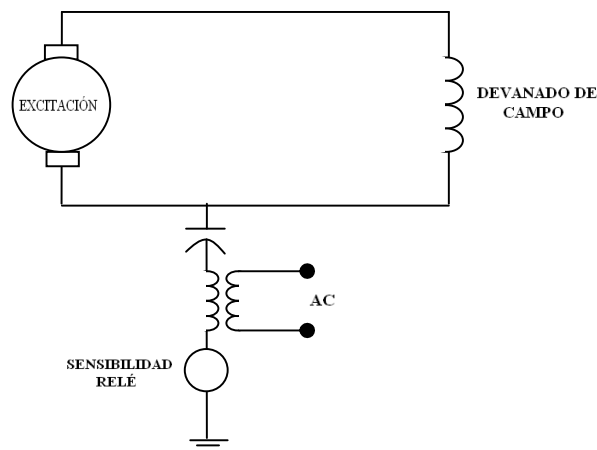


Figura 2.9 Método de inyección de corriente alterna

Este sistema carece de zona de insensibilidad, pero posee la desventaja que siempre tiene lugar una pequeña corriente de fuga que circula como consecuencia de la capacidad entre el enrollado de campo y masa del rotor (la que está conectada a tierra), y que puede tener consecuencias perjudiciales en los descansos de la máquina. La otra desventaja es que si llega a perderse la alimentación auxiliar de corriente alterna, la protección se torna inoperativa [7].

- c. **Método de inyección de corriente continua.** Este sistema es similar al de inyección de corriente alterna y abarca un transformador/puente rectificador. El polo positivo de salida del puente se conecta a tierra, mientras que en el polo negativo se conecta un relé y hacia el polo positivo del enrollado principal de campo como se muestra en la figura 2.10. Este sistema posee todas las ventajas del de inyección de corriente alterna, sin la desventaja de la circulación de las corrientes de fuga mediante los descansos del rotor [7].

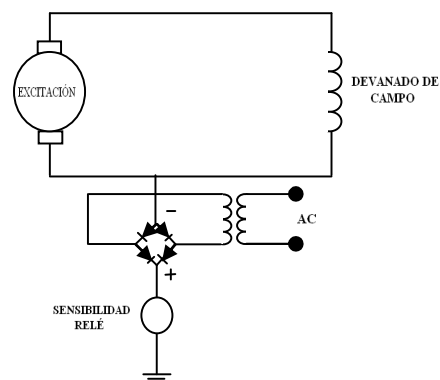


Figura 2.10 Método de inyección de corriente continua

2.1.2.2 Protección para circuito abierto

El circuito abierto en el rotor pocas veces sucede, pero de igual manera es necesario implementar una protección para esta situación debido a que en la apertura se forma un arco eléctrico que puede ocasionar daños en el núcleo del rotor. Un circuito abierto que no implique la tierra provoca una caída repentina de la corriente de campo que puede ser detectada por un relé de pérdida de campo.

2.1.2.3 Protección contra sobrecalentamiento del rotor

La circulación de corrientes de secuencia negativa en el estator de un generador, producidas por cortocircuitos asimétricos internos o externos al generador y cargas desequilibradas, originan un campo rotatorio que gira con una velocidad igual al doble de la síncrona con respecto al rotor e inducen en el hierro de este, corrientes de una frecuencia doble con respecto a la fundamental. Dichas corrientes originan un sobrecalentamiento del rotor y pueden producir importantes daños si el generador continúa operando en esas condiciones. Esta situación tiene lugar particularmente en los generadores accionados por turbinas a vapor con sus rotores del tipo cilíndrico.

2.1.3 Otros tipos de protecciones

2.1.3.1 Protección contra sobrevelocidad

Es casi imposible que en un generador conectado a la red se produzca una sobrevelocidad, ya que estas se dan por fallo o lentitud del regulador. La detección de sobrevelocidad se puede hacer de forma mecánica, de un relé voltimétrico conectado al indicador de velocidad y también por un relé de sobrefrecuencia.

2.1.3.2 Protección contra vibración

Se proporcionan contactos para disparar los interruptores principal y de campo si la vibración es mayor que la asociada con transitorios de cortocircuito normales para fallas externas a la unidad. Algunas veces se utiliza también un esquema de verificación de asentamiento de escobillas cuando éstas son retráctiles. El esquema requiere dos escobillas con una fuente de energía, la cual por acción del relé indica si alguna de las escobillas no asienta y por lo tanto la detección de tierra no está funcionando [7].

2.1.3.3 Contra motorización

El efecto de un desperfecto en la máquina motriz es que el generador comienza a operar como motor tomando energía del sistema. El beneficio de instalar una protección contra motorización recae en la máquina motriz o el sistema eléctrico y no en el generador. La seriedad de la condición de motorización está sujeta al tipo de máquina motriz.

En las turbinas de vapor, al ocurrir fallas en el abastecimiento de vapor, se produce un sobrecalentamiento como consecuencia de la fricción, con la posterior distorsión de los álabes de la turbina. En turbinas del tipo condensación la velocidad de subida de la temperatura es baja y no se requiere tomar una acción inmediata.

No obstante, con unidades del tipo contra presión la temperatura puede aumentar rápidamente a niveles peligrosos. Por esto, debe tomarse una medida inmediata para evitar la motorización. En los motores diesel es adecuado instalar protección contra motorización, debido al peligro de incendio o explosión por el combustible no quemado.

La protección contra motorización de generadores accionados por turbinas hidráulicas es adecuada en centrales inatendidas para evitar la cavitación de los álabes [7].

2.1.3.4 Contra pérdida de excitación

En el caso que un generador pierda su excitación, trabaja como generador de inducción girando a una velocidad mayor a la síncrona. Los generadores con rotor cilíndrico no están adecuados para estas operaciones, debido a que no tienen enrollados amortiguadores que puedan llevar las corrientes inducidas en el rotor. El tiempo para alcanzar un sobrecalentamiento peligroso puede ser alrededor de 2 a 3 minutos.

El estator de cualquier clase de generador síncrono puede sobrecalentarse debido a la sobrecorriente en los enrollados del estator mientras la máquina está operando como un generador de inducción. Algunos sistemas no pueden tolerar la operación continuada de un generador sin excitación. En el caso en que el generador no sea desconectado inmediatamente cuando pierde su excitación pueden surgir problemas de inestabilidad y ocurrir una pérdida de servicio mayor en el sistema eléctrico, debido a que un generador sin excitación adquiere potencia reactiva del sistema en una cantidad que puede ser dos a cuatro veces su potencia nominal. Además, es probable que el generador antes de perder su excitación haya estado entregando potencia reactiva al sistema. Como consecuencia de esta potencia reactiva tomada repentinamente del sistema y de la potencia reactiva que deja de entregar el generador, puede producirse una disminución general de tensión en el sistema, la que a su vez, puede producir una gran inestabilidad a menos que otros generadores puedan automática e inmediatamente tomar la carga reactiva adicional [7].

Como consecuencia de lo expuesto, es recomendable la instalación de un sistema de protección contra la pérdida de excitación. En el caso de que dicha pérdida, sea originada por un desperfecto en la excitatriz, el circuito de campo permanece intacto y el relé no trabaja debido a que lo mantienen las corrientes inducidas producidas por el deslizamiento.

2.2 ATERRIZAJE DEL GENERADOR SÍNCRONO

Los métodos mas utilizados para el aterrizaje del neutro del generador síncrono, son presentados a continuación.

2.2.1 Aterrizaje directo del neutro de la máquina a través de una resistencia

- A través de alta resistencia. En este caso el resistor limita corrientes típicas de fallas a tierra de 25A o menos.
- A través de baja resistencia. Las corrientes circulantes por el neutro son equivalentes a casi toda la corriente producida por la falla en el estator, las cuales, por lo general son mayores a 1500 A.

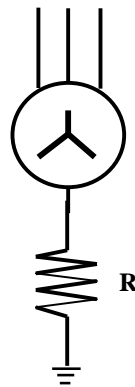


Figura 2.11 Esquema de aterrizaje directo del neutro a través de R

2.2.2 Aterrizaje directo del neutro de la máquina a través de una reactancia

Este método utiliza una reactancia inductiva entre el neutro y la tierra. Con este tipo de aterrizaje la corriente de falla se limita entre el 25 y el 100% de la corriente de un fallo trifásico (figura 2.12) [4].



Figura 2.12. Aterrizaje directo del neutro de la maquina a través de L

2.2.3 Aterrizaje del neutro de la máquina mediante un transformador de distribución con baja resistencia a tierra en el secundario

En este método, un transformador de distribución es conectado entre el neutro de la máquina y tierra, conectando en el lado secundario la resistencia de aterrizaje. La tensión primaria del transformador es igual o mayor a la tensión línea tierra del generador y la tensión en el secundario es normalmente 120/240 V con el fin de alimentar los relés (figura 2.13). La resistencia de aterrizaje debe ser seleccionada de forma tal que limite corrientes de falla a 25 A primarios [7].

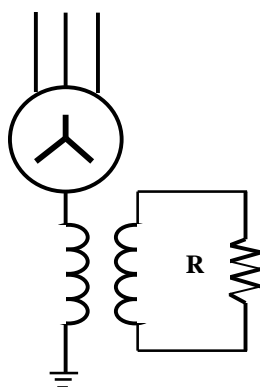


Figura 2.13 Esquema de aterrizaje mediante un transformador de distribución con baja resistencia

2.2.4 Aterrizaje del neutro de la máquina mediante un transformador de distribución con baja reactancia inductiva a tierra en el secundario

En este método se pone a tierra un transformador de distribución con una relación de transformación seleccionada de acuerdo al voltaje línea tierra de la máquina y con una reactancia a tierra como se muestra en la figura 2.14.

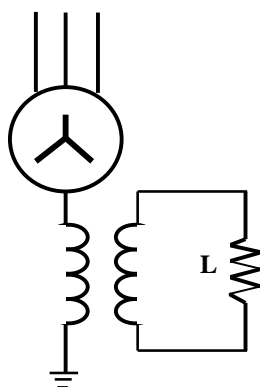


Figura 2.14 Esquema de aterrizaje mediante un transformador de distribución con baja reactancia inductiva

El valor de la reactancia en el secundario se selecciona de modo que cuando se refleje en el circuito primario, su reactancia sea igual a un tercio de la reactancia capacitiva de secuencia cero del generador y de todos los equipos conectados a este [11].

2.2.5 Aterrizaje del generador desde sus terminales

Este método usa un transformador a tierra conectado desde los terminales o barraje del generador cuando no se tiene acceso al neutro [4]. Este tipo de aterrizaje puede realizarse mediante distintas conexiones en el transformador como se muestran a continuación en las figuras 2.15, 2.16 y 2.17.

- Conexión Y- Δ

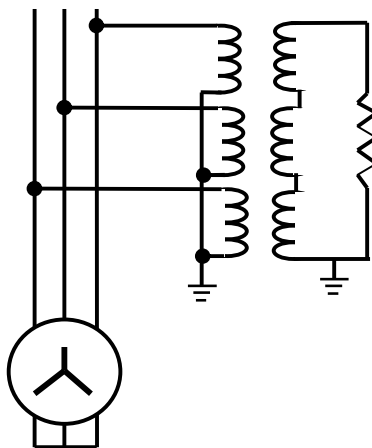


Figura 2.15 Esquema de aterrizaje del generador desde sus terminales (Y- Δ)

- Conexión Y- Δ con resistencia media en los terminales del generador

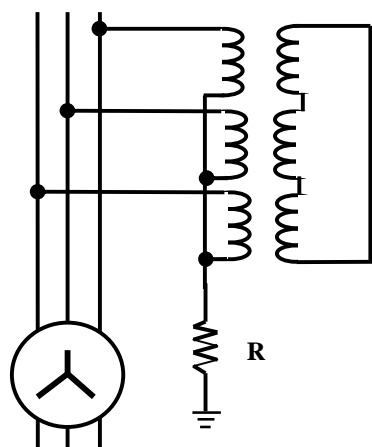


Figura 2.16 Esquema de aterrizaje con resistencia media en los terminales del generador

- Conexión Zig-Zag en los terminales del generador

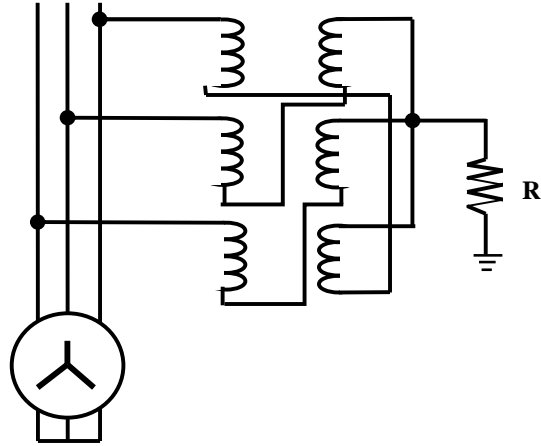


Figura 2.17 Esquema de aterrizaje del generador desde sus terminales con conexión Zig-Zag

3. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) han demostrado su capacidad para resolver problemas donde el computo tradicional a tenido gran dificultad durante años. Algunas de sus aplicaciones son: procesamiento de imágenes y voz, reconocimiento de patrones, planeamiento, predicción, control y optimización. Una red neuronal no es secuencial, esta solo responde en paralelo a las entradas que se le presenten y su conocimiento no se almacena en instrucciones si no en sus conexiones, las cuales son llamadas pesos [12].

La actividad que una unidad de procesamiento o neurona artificial realiza en un sistema de este tipo es simple. Normalmente, consiste en sumar los valores de las entradas que recibe de otras unidades conectadas a ella, comparar esta cantidad con el valor umbral y, si lo iguala o supera, enviar una salida o activación a las unidades a las que esté conectada. Tanto las entradas que la unidad recibe como las salidas que envía dependen a su vez del peso o fuerza de las conexiones por las cuales se realizan dichas operaciones [12].

3.1 NEURONA BIOLÓGICA

Una neurona es una célula viva, y como tal, contiene los mismos elementos que forman parte de todas las células biológicas, además de poseer elementos característicos que la diferencian. En general una neurona consta de un cuerpo celular más o menos esférico de 5 a 10 micras de diámetro y se diferencian de las células vivas en su capacidad de comunicación [12].

La neurona biológica consta de cuatro partes principales. Estas son:

- El soma o cuerpo de la célula: contiene el núcleo, que es el encargado de las actividades metabólicas de toda la neurona. Puede recibir información de otras neuronas en su superficie.
- Dendritas: son estructuras que parten del soma con ramificaciones. En términos generales, las dendritas y el cuerpo celular reciben señales de entrada, el cuerpo celular las combina e integra y emite señales de salida.
- Axón: es la rama principal que sale del cuerpo de la célula cuya función principal es el de transportar las señales de salida del cuerpo celular o soma hacia los terminales axónicos, los cuales se encargan de distribuir información a un nuevo conjunto de neuronas.
- Sinapsis: es el punto de conexión entre dos neuronas.

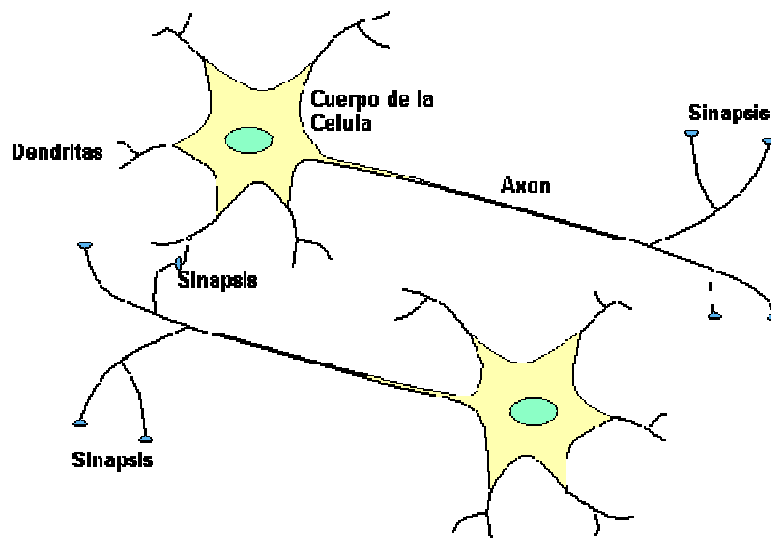


Figura 3.1 Neurona biológica y sus partes [13]

3.1.1 Funcionamiento de la neurona biológica

La estructura y funcionamiento de la unidad elemental de procesamiento de una red conexionista es muy sencillo. Cuando una neurona está en reposo su membrana externa mantiene una diferencia de potencial de -70mV (la superficie interior es negativa con respecto a la superficie externa) y cuando esta recibe un estímulo, es decir, si la suma de entradas excitatorias supera el umbral de activación de la unidad (20mV), y además no hay una entrada inhibitoria, la permeabilidad de sus componentes químicos aumenta, lo cual produce una entrada repentina de cargas positivas. Esta entrada produce un impulso (una inversión momentánea del potencial de la membrana) cuyo valor es representado por 1. El caso contrario sucede cuando la neurona no se activa (un valor 0 que indica la ausencia de respuesta). Cuando el impulso alcanza los terminales del axón de la neurona que suministra el impulso de entrada (presináptica), este induce la liberación de moléculas neurotransmisoras. Los transmisores se difunden y alcanzan los receptores de la membrana de la neurona receptora del impulso (postsináptica). Combinando varias neuronas de este tipo con los adecuados umbrales de respuesta, se puede construir una red que compute cualquier función lógica finita [14].

3.1.2 Aprendizaje de la neurona biológica

La base de las reglas de aprendizaje que fue desarrollada por O. Hebb [12], en su versión más elemental, se expresa como sigue:

“Cuando un axón de una célula A está bastante cerca para excitar a una célula B y repetida o persistentemente dispara, entonces se produce algún proceso de desarrollo o cambio metabólico de tal forma que la eficiencia del disparo de A hacia B aumenta”.

Esta regla es de especial relevancia porque indica que la información necesaria para modificar el valor de una conexión se encuentra localmente disponible a ambos lados de la conexión como se muestra en la figura 3.2. Una segunda regla propuesta por Ladislav Tauc y Eric Kandel [12], consiste en que la conexión sináptica entre dos neuronas se puede fortalecer sin actividad de la célula postsináptica por medio de una tercera neurona llamada neurona moduladora que incrementa la liberación del neurotransmisor de la célula presináptica (figura 3.3).

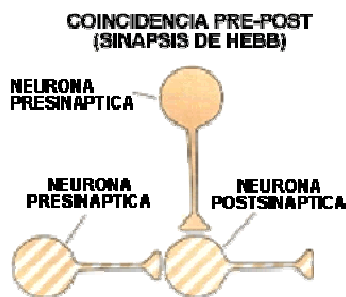


Figura 3.2 Ley de Hebb

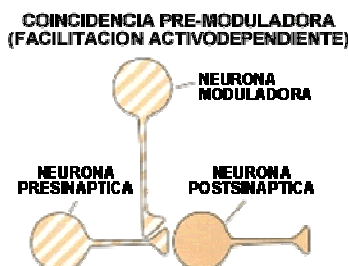


Figura 3.3 Regla de Ladislav-Kandel

3.2 NEURONA ARTIFICIAL

La neurona artificial imita las características más importantes de la neurona biológica como se puede observar en la figura 3.4. En general, recibe las señales de las neuronas vecinas ponderadas por los pesos de las conexiones. La suma de estas señales ponderadas proporciona la entrada total o neta de la neurona y, mediante la aplicación de una función matemática (denominada función de salida), sobre la entrada neta, se calcula un valor de salida, el cual es enviado a otras neuronas. Tanto los valores de entrada a la neurona como su salida pueden ser señales excitatorias (cuando el valor es positivo) o inhibitorias (cuando el valor es negativo) [14].

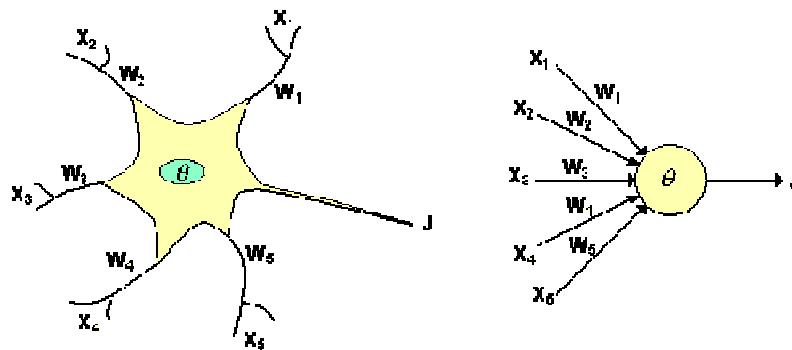


Figura 3.4 Imitación de la neurona artificial [13]

Las características de la neurona biológica presentes en la neurona artificial son:

- Entradas: representan las señales que provienen de otras neuronas y que son capturadas por las dendritas.
- Bloque sumador: es el nodo sumatorio que acumula todas las señales de entradas multiplicadas por los pesos o ponderadas y la pasa las señales a la salida a través de una función umbral o función de transferencia.
- Pesos: codifican el conocimiento de la red. En el caso análogo de las neuronas biológicas, son equivalentes a la sinapsis.

La relación entre ellos se presenta a continuación:

$$neta_i = \sum_{i=1}^n W_i X_i = \overline{X} \overline{W} \quad (3.1)$$

Donde:

W_i : vector de pesos.

X_i : vector de entrada.

3.2.1 Función de transferencia o salida

La función de transferencia determina la forma de los datos de salida de la neurona y se selecciona de acuerdo a la naturaleza de los datos de entrada a la red. Los tipos de funciones de transferencia más comunes son:

- Función escalón: es usada en neuronas binarias. Su salida es uno siempre y cuando la suma-producto supere el valor umbral.

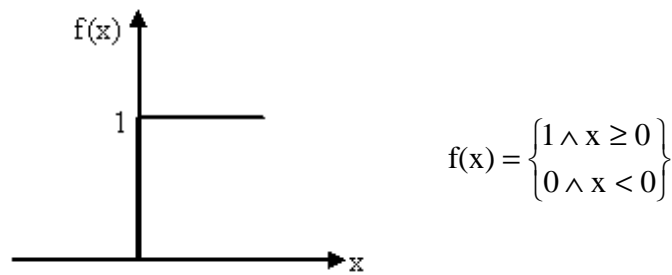


Figura 3.5. Función escalón

- Función lineal-mixta: la función lineal está dada por $f(x)=ax$. Se selecciona esta función si el objetivo principal es la suma-producto y no limitar los datos de salida de la neurona. Esta función es la combinación de la función escalón y lineal.

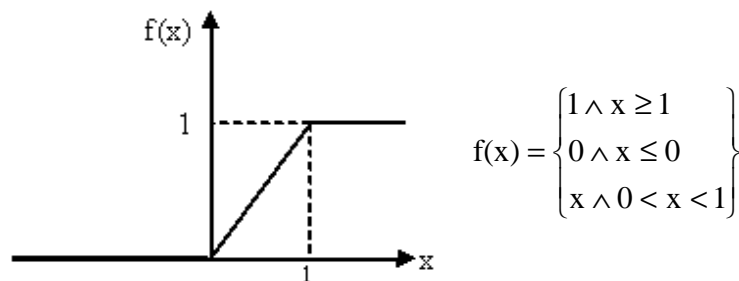


Figura 3.6. Función lineal-mixta

- Función sigmoideal: esta función es la más común para una red de clasificación de patrones. Esta función es importante debido a que su derivada positiva hace que se puedan utilizar las reglas de aprendizaje, dado que para los valores de estímulo de entrada (valores independientes), el valor de la función es cercano a uno de los dos valores asintóticos. Esto hace que los valores en la salida estén comprendidos entre la zona alta o baja de la sigmoide.

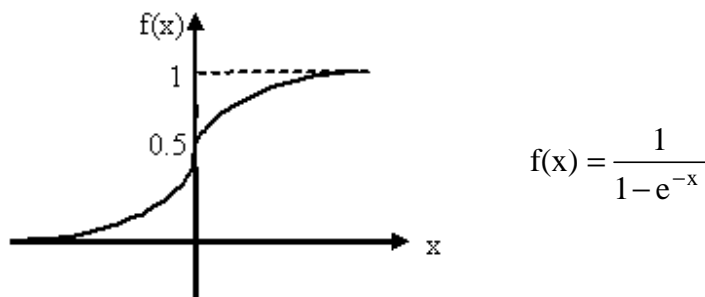


Figura 3.7. Función sigmoideal

- Función Tangente hiperbólica: presenta características similares a la función sigmoideal. La diferencia está en que requiere mayor tiempo computacional para evaluar su derivada.

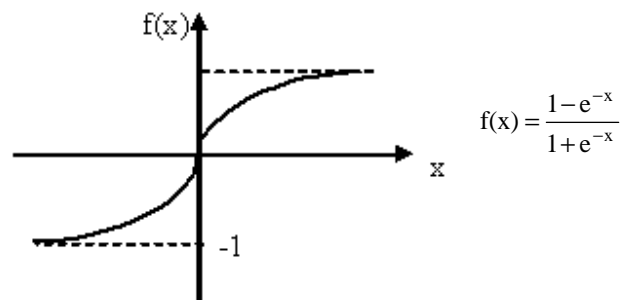


Figura 3.8. Función tangente hiperbólica

3.2.2. Estructura y características de una RNA

3.2.2.1. Niveles o capas de neuronas

La distribución de neuronas dentro de la red se realiza formando niveles o capas de un número determinado de neuronas cada una, como se muestra en la figura 3.9. Estas se dividen en:

- Capa de entrada: es la capa que recibe directamente la información de las fuentes externas a la red.
- Capa oculta: son internas a la red y no tienen contacto directo con el exterior. El número de niveles ocultos puede estar entre cero y un número elevado. Las neuronas de las capas ocultas pueden estar interconectadas de distintas formas, lo que determina las distintas topologías de redes neuronales.
- Capa de salida: transfieren información de la red hacia el exterior.

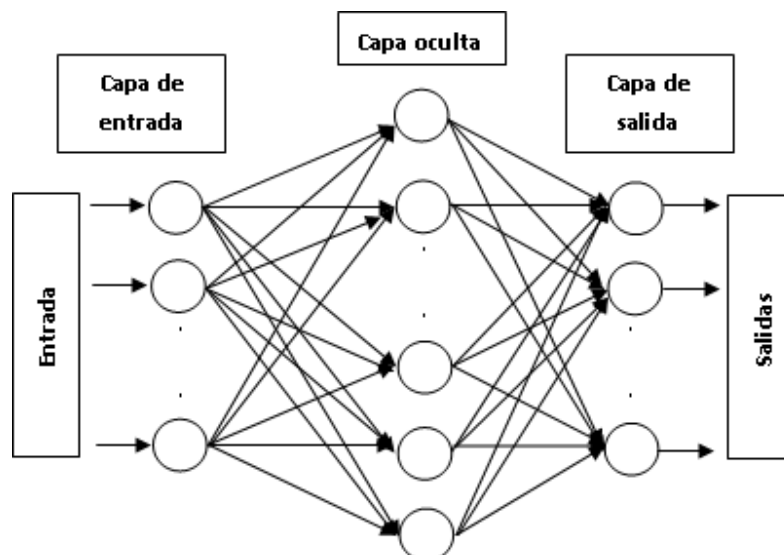


Figura 3.9 Estructura de una red neuronal típica

De acuerdo a su topología la red neuronal se clasifica en:

- Red monocapa (1 capa): en esta se establecen conexiones laterales entre las neuronas que pertenecen a la única capa que constituye la red. Estas son utilizadas para las tareas relacionadas con auto asociación.
- Red multicapa: son aquellas que disponen de conjuntos de neuronas agrupadas en varios niveles o capas.

3.2.2.2 Formas de conexión entre neuronas

La forma de conexión entre los nodos de una red neuronal está relacionada con la forma en que la salida de las neuronas está canalizada para convertirse en entradas de otras neuronas. La señal de salida en un nodo puede ser entrada de otro elemento del proceso, o incluso ser una entrada de si mismo (conexión autorrecurrente).

Cuando ninguna salida de las neuronas es entrada de neuronas del mismo nivel o niveles posteriores, la red se describe como de propagación hacia adelante (feedforward). Cuando las salidas pueden ser conectadas como entradas de neuronas de niveles previos o del mismo nivel, incluyéndose ellas mismas, se denomina red de propagación hacia atrás (feedback); en otras palabras existe un camino de realimentación entre capas.

3.2.2.3 Mecanismo de aprendizaje

El mecanismo de aprendizaje difiere de acuerdo a las características del modelo de la red neuronal y de la aplicación de la misma, ya que los criterios para definir los pesos no son los mismos; por ello hay dos tipos diferentes de reglas de aprendizaje: supervisados y no supervisados [14].

La diferencia entre los tipos supervisados y no supervisados es un agente externo (supervisor) que controla el proceso de aprendizaje de la red. Adicionalmente puede ser on-line u off-line. En el primer caso la red aprende durante su funcionamiento, mientras el segundo está dividido en dos fases. Una fase es de entrenamiento, durante el cual la red modifica los pesos mediante una repetición sistemática de valores entrada-salida, para después entrar a la segunda fase que es la de operación.

En la tabla 3.1 se ilustran los modelos más comunes de redes neuronales. Para el desarrollo de este trabajo se hace énfasis en la red Backpropagation (BP), debido a que ésta tiene la capacidad de clasificación de patrones, según las características de los datos de ejemplo o de entrenamiento.

Tabla 3.1. Clasificación de las RNA

ENTRADA BINARIA		ENTRADA CONTINUA	
Supervisado	No supervisado	Supervisado	No supervisado
Red Hamming	ART (Adaptative Resonance Theory)	Perceptron	Mapas de Kohonen o LAM
Red Hopfield	ART	Backpropagation	-----

3.3 RED BACKPROPAGATION

El algoritmo de propagación hacia atrás o backpropagation, es una regla de aprendizaje que se puede aplicar en modelos de redes con mas de dos capas de neuronas. Una característica importante de este algoritmo es la representación interna del conocimiento que es capaz de organizar en la capa intermedia de las neuronas, para conseguir cualquier correspondencia entre la entrada y salida de la red.

La importancia de la red BP consiste en su capacidad de autoadaptar los pesos de las neuronas de las capas intermedias para aprender la relación que existe entre un conjunto de patrones dados como ejemplo y sus salidas correspondientes, para poder aplicar esa misma relación, después del entrenamiento, a nuevos vectores de entrada con ruido o incompletas, dando una salida activa si la nueva entrada es parecida a las presentadas durante el aprendizaje. La red debe encontrar una representación interna que le permita generar las salidas deseadas cuando se le den las entradas de entrenamiento, y pueda aplicar, además, a entradas no presentadas durante la etapa de aprendizaje para clasificarlas según las características que compartan con los ejemplos de entrenamiento.

3.3.1 Funcionamiento de la red

El funcionamiento de la red backpropagation consiste en un aprendizaje de un conjunto predefinido de pares de entradas-salidas dados como ejemplo, empleando un ciclo de propagación-adaptación de dos fases: primero se aplica un patrón de entrada como estímulo para la primera capa de las neuronas de la red, se va propagando a través de todas las capas superiores hasta generar una salida, se compara el resultado obtenido en las neuronas de salida con la salida deseada y se calcula un valor de error para cada neurona de salida. Estos errores se transmiten hacia atrás partiendo de la capa de salida hacia todas las neuronas de la capa intermedia que contribuyen directamente a la salida, recibiendo el porcentaje de error aproximado a la partición de la neurona intermedia a la salida original. Este proceso se repite capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido un error que describa su aportación relativa al error total [14]. Basándose en el valor del error recibido, se reajustan los pesos de conexión de cada neurona, para hacer que la red converja hacia un estado que permita codificar todas las etapas de entrenamiento. Un buen entrenamiento

conduce a una generalización, esto es, la capacidad de una red de entregar respuestas correctas ante entradas desconocidas, es decir patrones no entrenados [13].

3.3.2 Entrenamiento de la red

Esta red es de aprendizaje supervisado y la actualización de los pesos depende de la ubicación de estos, es decir, se emplean dos ecuaciones: una para actualizar las conexiones de la capa de salida y otra para las conexiones de las capas intermedias, incluidas las conexiones de entrada. Esta red neuronal tiene n entradas, L neuronas en la capa oculta y m neuronas en la salida. También se cuenta con unas unidades de tendencia o bias las cuales tienen igual manejo que los pesos, por tanto se representan con W acompañada con un superíndice el cual indica la capa en la que están (una h está asociada a la capa oculta y una o a la salida), y un subíndice que señala a que neurona hace referencia [13].

3.3.2.1 Propagación hacia adelante

El set de entrenamiento está conformado por patrones ordenados en pares entrada (X_p) – salida (d_p), como se ilustra a continuación.

$$X_p = \begin{bmatrix} X_{p1} \\ X_{p2} \\ X_{p3} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ X_{pi} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ X_{pn} \end{bmatrix} \quad d_p = \begin{bmatrix} d_{p1} \\ d_{p2} \\ d_{p3} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ d_{pi} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ d_{pn} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

El patrón X_p debe seguir los siguientes pasos:

- i. Calcular la entrada neta para todas las neuronas de la capa oculta. La entrada neta se calcula de igual forma que S_k , por lo tanto se tiene la siguiente expresión:

$$neta^h_{pj} = \sum_{i=1}^n W_{ji} X_{pi} + W_j^h \quad \text{con } j= 1 \dots L \quad (3.3)$$

Donde,

- L: número de neuronas de la capa oculta.
- $neta_{pj}^h$: entrada neta, en la neurona j de la capa oculta h, con el patrón Xp propagándose.
- W_{ji} : peso entre la neurona j de la capa oculta y la neurona i de la capa de entrada.
- X_{pi} : entrada de la neurona i del patrón Xp.
- W_j^h : bias de la neurona j de la capa oculta.

Para el cálculo de la entrada neta solamente intervienen los pesos que llegan a la neurona j, multiplicados por las entradas X_{pi} ; este cálculo se tiene que hacer para cada una de las L neuronas que conforman la capa.

- ii. Hallar las salidas de las neuronas de la capa oculta. La salida depende de la función de transferencia seleccionada para dicha capa. Por lo tanto:

$$I_{pj} = f_j^h neta_{pj}^h \quad \text{con } j = 1 \dots L \quad (3.4)$$

Donde,

- L: número de neuronas de la capa oculta.
- $neta_{pj}^h$: entrada neta, en la neurona j de la capa oculta h, con el patrón Xp propagándose.
- I_{pj} : salida de la neurona j de la capa oculta, con el patrón Xp propagándose.
- f_{hj} : función de transferencia de la neurona j de la capa oculta.

Se calcula para las L neuronas de esta capa; cada neurona tiene una función de transferencia y se recomienda elegir una función que sea la misma para todas las neuronas de la capa (esto se hace para facilitar la implementación del algoritmo) [13].

- iii. Determinar las entradas netas. Una vez obtenida las salidas de las neuronas j de la capa oculta, estas se propagan a la siguiente capa de la siguiente forma:

$$neta_{pk}^0 = \sum_{j=1}^L W_{kj} I_{pj} + W_j^0 \quad \text{con } k = 1 \dots m \quad (3.5)$$

Donde,

- m: número de neuronas de la capa de salida.
- $neta_{pk}^0$: entrada neta, en la neurona k de la capa de salida, con el patrón Xp propagándose.
- I_{pj} : salida de la neurona j de la capa oculta, con el patrón Xp propagándose.

W_k^0 : Bias de la neurona k de la capa de salida.

En el cálculo de la entrada neta de la neurona k intervienen todos los pesos que llegan a esta neurona.

iv. Procesamiento local en las neuronas de salida. Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$O_{pk} = f_k^0 \text{neta}_{pk}^0 \quad \text{con } k= 1 \dots m \quad (3.6)$$

Donde,

m: número de neuronas de la capa de salida.
 neta_{pj}^0 : entrada neta, en la neurona k de la capa de salida.
 f_k^0 : función de transferencia de la neurona k de la capa de salida.
 O_{pk} : salida de la neurona k de la capa de salida, con el patrón X_p propagándose.

Con la ecuación anterior, se obtiene el vector de salida O_p .

3.3.2.2 Pasos para entrenar la red

- i. Inicializar los pesos de la red con valores pequeños aleatorios.
- ii. Escoger el primer patrón de entrenamiento y propagarlo por la red para obtener el vector de salida.
- iii. Calcular el error para las neuronas de las capas de la siguiente forma:
 - Para la capa de salida:

$$\delta_{pk}^0 = (d_{pk} - O_{pk}) f_k^{0'}(\text{neta}_{pk}^0) \quad \text{con } k= 1 \dots m \quad (3.7)$$

Donde,

m: número de neuronas de la capa de salida.
 f_k^d : derivada de la función de transferencia de la neurona k, de la capa de salida, evaluada en neta_{pk}^0 .
 d_{pk} : salida deseada para la neurona k.
 O_{pk} : salida de la neurona k obtenida al propagar el patrón p.
 δ_{pk}^0 : términos de error para las unidades de salida.

- Para la capa oculta:

$$\delta_{pj}^h = f_j^{h'}(\text{neta}_{pj}^h \sum_k \delta_{pk}^0 W_{kj}^0) \quad \text{con } j = 1 \dots L \quad (3.8)$$

Donde,

- L: número de neuronas de la capa oculta.
- $f_j^{h'}$: derivada de la función de transferencia de la neurona j, de la capa oculta, evaluada en neta_{pk}^0 .
- δ_{pj}^h : términos de error para las unidades ocultas.
- $\sum \delta_{pk}^0 * W_{kj}^0$: contribución al error global, de las conexiones que salen de la neurona.
- δ_{pk}^0 : términos de error para las unidades de salida.

iv. Actualizar los pesos y bias de las capas de la siguiente forma:

- Para la capa de salida:

$$\begin{aligned} W_{kj}(t+1) &= W_{kj}(t) + \Delta W_{kj}(t+1) \\ \Delta W_{kj}(t+1) &= \eta \delta_{pk}^0 I_{pj} \end{aligned} \quad \text{con } k=1 \dots m \text{ y } j=1 \dots L \quad (3.9)$$

Donde m es el número de neuronas de la capa de salida y L el número de neuronas de la capa oculta.

- Para la capa oculta:

$$\begin{aligned} W_{ji}(t+1) &= W_{ji}(t) + \Delta W_{ji}(t+1) \\ \Delta W_{ji}(t+1) &= \eta \delta_{pj}^h X_{pi} \end{aligned} \quad \text{con } j=1 \dots L \text{ e } i=1 \dots n \quad (3.10)$$

Donde n es el número de neuronas de la capa de entrada y L el número de neuronas de la capa oculta.

v. Calcular el error medio cuadrático para el patrón p-ésimo:

$$E_p^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (d_{pk} - O_{pk})^2 \quad (3.11)$$

Donde E_p^2 es el error medio cuadrático para el patrón p-ésimo.

vi. Hallar el error medio cuadrático para todos los patrones:

$$E = \sum_{i=1}^k E_{pi}^2 \quad (3.12)$$

Donde E es el error medio cuadrático total, E_{pi}^2 es el error medio cuadrático para el patrón p -ésimo y k es el número de patrones de entrenamiento.

El algoritmo finaliza cuando el error sea menor que la tolerancia predefinida. De lo contrario se elige otro patrón y se repite el procedimiento desde la ecuación 3.3.

3.3.3 Consideraciones sobre el algoritmo de aprendizaje

En el algoritmo BP cada punto de la superficie de la función de error corresponde a un conjunto de valores de los pesos de la red. Con el gradiente descendente, siempre que se realiza un cambio en los pesos de la red, se asegura el descenso por la superficie del error hasta encontrar el valle más cercano, lo que puede ser que el proceso de aprendizaje se detenga en un mínimo local de error. Uno de los problemas que presenta este algoritmo de entrenamiento de redes multicapa es que busca minimizar la función de error, pudiendo caer en un mínimo local o en un punto estacionario, por lo cual no se llega a encontrar el mínimo global de la función del error. Debe también considerarse que no tiene que alcanzarse necesariamente el mínimo global en todas las aplicaciones, por lo que puede ser suficiente con un error mínimo preestablecido.

Para evitar que se presente el problema de caer en un mínimo local o en punto estacionario, se debe elegir un incremento de paso adecuado que influye en la velocidad con la que converge el algoritmo. Esta velocidad se controla a través de la constante de proporcionalidad o tasa de aprendizaje α (que es del orden de 0,05 a 0,25), para asegurar que la red llegue a asentarse en una solución [14]. Un valor pequeño de α significa que la red tiene que hacer un gran número de iteraciones. Si esa constante es muy grande, los cambios de pesos son muy grandes avanzando rápidamente por la superficie de error, con el riesgo de saltar el mínimo y estar oscilando alrededor del punto, pero sin poder alcanzarlo (figura 3.10) [12].



Figura 3.10 Representación típica de una forma de la superficie de error

Otra forma de incrementar la velocidad de convergencia es añadir un término denominado momento, el cual consiste en sumar una fracción del anterior cambio cuando se calcula el valor del cambio del peso actual. Este término hace mantener los cambios de pesos en la misma dirección y se expresa por la ecuación 3.13.

$$M(t) = \alpha(W_{kj}(t) - W_{kj}(t-1)) \quad (3.13)$$

Donde,

$M(t)$: momento para el instante t .
 α : constante de momento, suele ser positiva y menor que uno.
 $\Delta W_{kj}(t-1)$: diferencial para el peso de conexión entre la neurona k -ésima y la j -ésima de la anterior capa.

La ecuación para la capa de salida con el término de momento es:

$$W_{kj}(t+1) = W_{kj}(t) + \eta \delta_{pk}^0 I_{pj} + \alpha(W_{kj}(t) - W_{kj}(t-1)) \quad \text{con } j=1 \dots L \text{ y } k=1 \dots m \quad (3.14)$$

Donde m es el número de neuronas de la capa de salida y L el número de neuronas de la capa oculta.

Para los pesos y bias de la capa oculta:

$$W_{ji}(t+1) = W_{ji}(t) + \eta \delta_{pj}^h X_{pi} + \alpha(W_{ji}(t) - W_{ji}(t-1)) \quad \text{con } j=1 \dots L \text{ e } i=1 \dots n \quad (3.15)$$

Donde n es el número de neuronas de la capa de salida y L el número de neuronas de la capa oculta.

Si una red deja de aprender antes de llegar a una solución aceptable, se realiza un cambio en el número de neuronas ocultas o en los parámetros de aprendizaje o, simplemente se vuelve a empezar con un conjunto de pesos originales.

3.3.3.1 Dimensionamiento de la red

Para el dimensionamiento de la red no existe una regla general o concreta para determinar el número de capas o de neuronas por capa para resolver un problema dado. Por esta razón solo se dan ideas generales deducidas de la experiencia del diseñador. En general para una red son suficientes tres capas (entrada-oculta-salida), sin embargo, el tamaño de las capas, tanto de entrada como de salida suele ser determinada por la naturaleza de la aplicación. El número de neuronas ocultas interviene en la eficiencia de aprendizaje y de generalización

de la red. La determinación de la cantidad de estas se realiza por tanteo, es decir ensayo y error. Las recomendaciones para encontrar el número de neuronas en la capa oculta es eliminando neuronas ocultas si la red converge sin problema alguno, determinando el número final en función del rendimiento global del sistema. Si la red no converge es posible que sea necesario aumentar este número [13].

3.3.3.2 Inicialización de los pesos

Para inicializar los pesos, se parte de un punto cualquiera del espacio con valores pequeños y aleatorios, ya que idealmente no se puede lograr ubicar un punto inicial en cercanías del punto mínimo del error buscado.

3.3.3.3 Determinación de la función de transferencia

La función de transferencia determina la forma de los datos de salida de la neurona y se selecciona de acuerdo a la naturaleza de los datos de entrada a la red. En los casos en que se desea manejar datos binarios es recomendable usar la función sigmoideal la cual limita la salida y es biestable.

4. APLICACIÓN DE RNA EN LA PROTECCIÓN DE GENERADORES SÍNCRONOS

Debido a que las protecciones convencionales no cubren el 100% del devanado estatórico y que han sido poco efectivos en la detección de fallas a tierra cuando el neutro del generador está aterrizado con una alta impedancia, se presenta en este capítulo una metodología basada en RNA para la protección diferencial del generador síncrono cuando se presentan fallas monofásicas cerca al 90% del devanado del estator.

El problema que se tiene con la protección diferencial convencional para fallas a tierra del devanado del estator cercanas al punto neutro, es la identificación de las corrientes del tercer armónico, las cuales son muy pequeñas y su detección muchas veces no ocurre, ocasionando que el relé de protección no opere bajo ciertas circunstancias en las que debe hacerlo.

Para corregir los problemas mencionados anteriormente se entrena y prueba una RNA la cual facilita la identificación de las corrientes de operación normal y de falla. Par lograr esto se utiliza el modelo circuital basado en las tensiones y corrientes del tercer armónico, ya que este facilita el estudio del generador síncrono bajo las condiciones de operación y de falla debido a su comportamiento lineal.

4.1 MODELO BASADO EN EL TERCER ARMÓNICO

4.1.1 Componentes armónicas presentes en el neutro del generador

Como se mencionó en el capítulo dos, las componentes del tercer armónico presentes en el neutro del generador son conocidas como las del tercer orden (tercero, sexto, noveno, etc.). Por lo general estas tensiones del tercer armónico presentes en el neutro van desde 1% al 6% de la tensión nominal fundamental por fase y adicionalmente varían con la cargabilidad de la máquina, tal como se muestra en la figura 4.1.

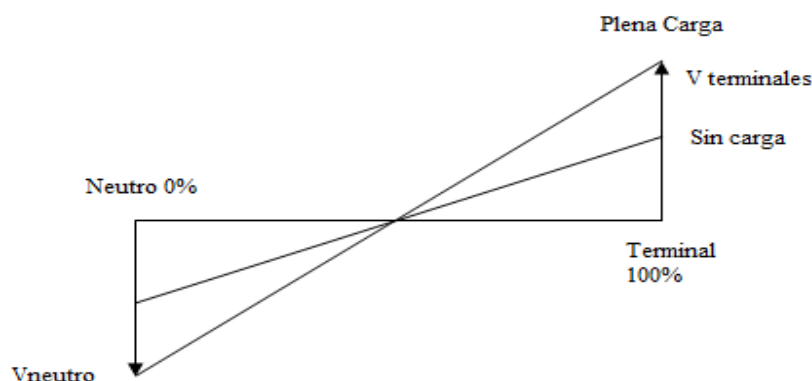


Figura 4.1 Tensión del tercer armónico en condiciones normales de operación

El voltaje del tercer armónico en condiciones de falla se ve afectado según la posición de la falla en el devanado estatórico y por la cargabilidad. Cuando la falla ocurre en el neutro el voltaje del tercer armónico en los terminales aumenta hasta llegar a su valor máximo, mientras que el neutro tiende a cero. Caso contrario ocurre cuando la falla se presenta en los terminales del generador.

4.1.2 Esquema típico de conexión de una unidad generadora a la red

Para la implementación del modelo circuital basado en el esquema de tercer armónico es necesario tener en cuenta los efectos que producen los equipos que conforman el esquema de conexión de la unidad generadora a la red. Dichos equipos (interruptores de potencia, barrajes, transformadores elevadores, impedancia de aterrizaje), aportan cambios significativos a la tensión del tercer armónico por medio de la suma de las capacitancias, la cual es vista por el generador en sus terminales (ver figura 4.2).

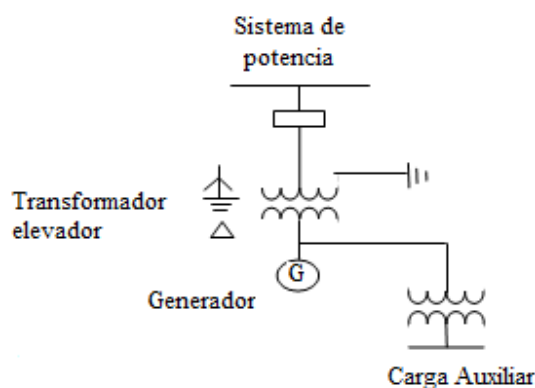


Figura 4.2 Elementos que influyen en el modelo circuital del devanado estatórico

4.1.3 Modelo circuital equivalente del generador síncrono mediante voltajes y corrientes del tercer armónico

4.1.3.1 Modelo del generador síncrono en condiciones de operación normal

El generador puede ser modelado de la siguiente forma [15]:

- Una reactancia por fase cuyo valor es X_d , X'_d o X''_d los cuales son la reactancia síncrona, transitoria y subtransitoria, respectivamente.
- La capacitancia del devanado del estator a tierra C_g , puede ser modelada como un capacitor por fase y ubicado después de la reactancia.
- El voltaje del tercer armónico es representado por E_3 , el cual es el resultado de los terceros armónicos producidos en el devanado del estator, los cuales son iguales en

magnitud y ángulo en cada una de las tres fases. Se representa como una fuente de voltaje.

- Los equipos auxiliares del esquema de conexión unidad generador-transformador se representan con sus capacitancias a tierra C_p .
- El aterrizaje de alta impedancia se representa por R_n .

En la figura 4.3 se muestra el modelo circuital del generador síncrono mediante voltajes del tercer armónico en operación normal con el método de aterrizaje de alta resistencia.

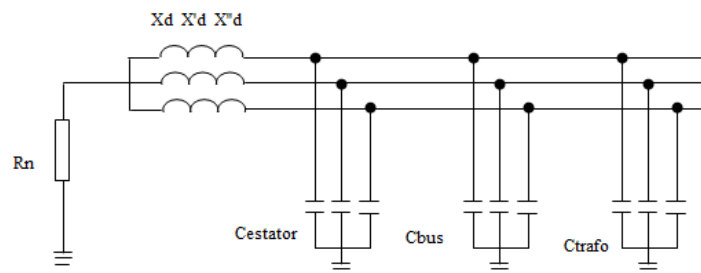


Figura 4.3 Modelo circuital del generador síncrono mediante voltajes del tercer armónico

Teniendo en cuenta lo anterior, la resistencia y el efecto inductivo producido por los devanados del estator, pueden ser omitidos ya que los valores numéricos de estos parámetros son tan pequeños que si se tienen en cuenta en el modelo final no producirán ningún cambio significativo en la tensión del tercer armónico. Por lo tanto, no son necesarios para obtener un modelo preciso de los devanados del estator de la máquina síncrona (ver figura 4.4) [16].

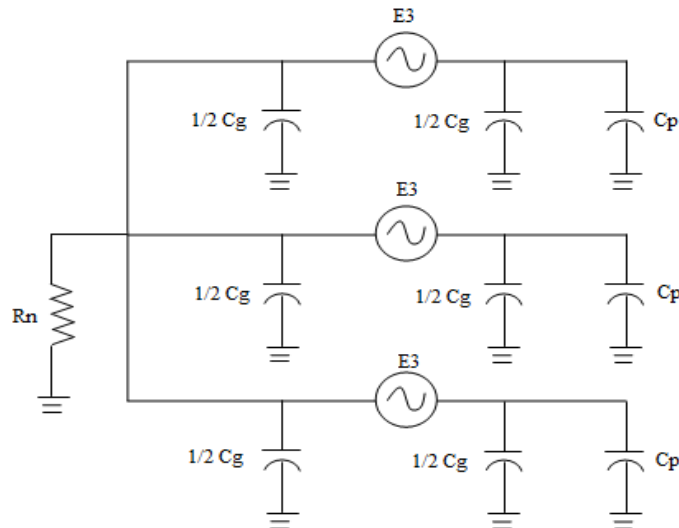


Figura 4.4. Circuito equivalente en condiciones normales de operación

Se puede obtener un modelo circuital equivalente del estator bajo condiciones de operación normal por componentes simétricas, las fallas línea a tierra son calculadas conectando las redes de secuencia positiva, negativa y cero en serie. Las impedancias equivalentes de secuencia positiva y negativa del sistema y la impedancia de secuencia cero del generador pueden ser despreciadas debido a que son extremadamente pequeñas comparadas con el circuito equivalente compuesto por el resistor del neutro y la capacitancia de secuencia cero [6]. En las figuras 4.5 y 4.6 se observa el modelo equivalente del generador usando componentes de secuencia cero y el reducido de secuencia cero, respectivamente.

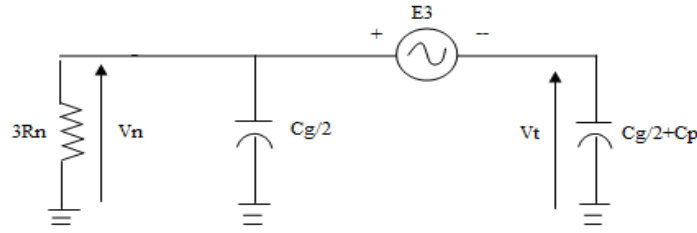


Figura 4.5 Modelo circuital usando componentes de secuencia cero

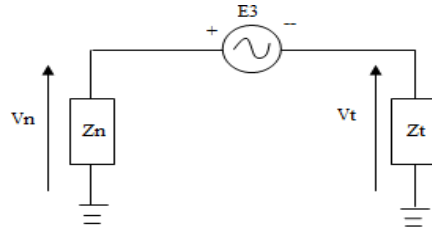


Figura 4.6 Circuito reducido de secuencia cero

Las ecuaciones con las que se pueden obtener los valores anteriores son:

$$V_n = \frac{3\pi f R_n [C_g + C_p] * E_3}{\sqrt{1 + [6\pi f R_n [C_g + C_p]^2]}} \quad (4.1)$$

$$a = [1 + 18(\pi f R_n)^2 C_g (C_g + C_p)]^2 \quad (4.2)$$

$$V_t = \frac{E_3 \sqrt{a + [3\pi f R_n (C_g + C_p)]^2}}{1 + [6\pi f R_n [C_g + C_p]^2]} \quad (4.3)$$

$$I_n = \frac{E_3}{Z_n - Z_t} \quad (4.4)$$

$$I_t = I_n \quad (4.5)$$

$$Z_n = \frac{i}{3\pi f R_n C_g i + 1} \quad (4.6)$$

$$Z_t = \frac{i}{(\pi f)(C_g + 2C_p)} \quad (4.7)$$

Donde,

- V_n : voltaje en el neutro.
- V_t : voltaje en terminales.
- f : frecuencia del tercer armónico.
- R_n : resistencia de aterrizaje.
- E_3 : voltaje del tercer armónico.
- C_g : capacitancia del devanado del estator a tierra.
- C_p : capacitancia de los equipos auxiliares.
- Z_n : impedancia del neutro.
- Z_t : impedancia del terminal .
- I_n : corriente en el neutro.
- I_t : corriente en terminales.

4.1.3.2 Modelo del generador síncrono en condiciones de operación bajo falla

Para el modelamiento circuital bajo fallas monofásicas se parte del circuito en operación normal donde dos fases quedan iguales y la fase en falla se modifica, para que cumpla con el comportamiento de la tensión y corrientes del tercer armónico. Esta modificación se puede observar en la figura 4.7.

El generador puede ser modelado de la siguiente forma:

- La capacitancia del devanado del estator a tierra C_g puede ser modelado como un capacitor por fase y ubicado después de la reactancia.
- El voltaje del tercer armónico es representado por E_3 , el cual es el resultado de los terceros armónicos producidos en el devanado del estator. Estos son iguales en magnitud y ángulo en cada una de las tres fases. Se muestra como una fuente de voltaje.
- Los equipos auxiliares del esquema de conexión unidad generador-transformador se representa con sus capacitancias a tierra C_p .
- El aterrizaje de alta impedancia se representa por R_n .
- Resistencia de falla R_f .
- Tensión del tercer armónico en terminales de la fase en falla E_{3t} .
- Tensión del tercer armónico en el neutro de la fase en falla E_{3n} .
- Capacitancias con respecto al neutro C_n .
- Capacitancias con respecto a los terminales C_t .
- Para el fallo se debe tener en cuenta la posición donde ocurre la falla en los devanados del estator. A esto se le debe asignar una constante que represente la posición de la falla ($K=0$ para el neutro y $K=1$ para los terminales).

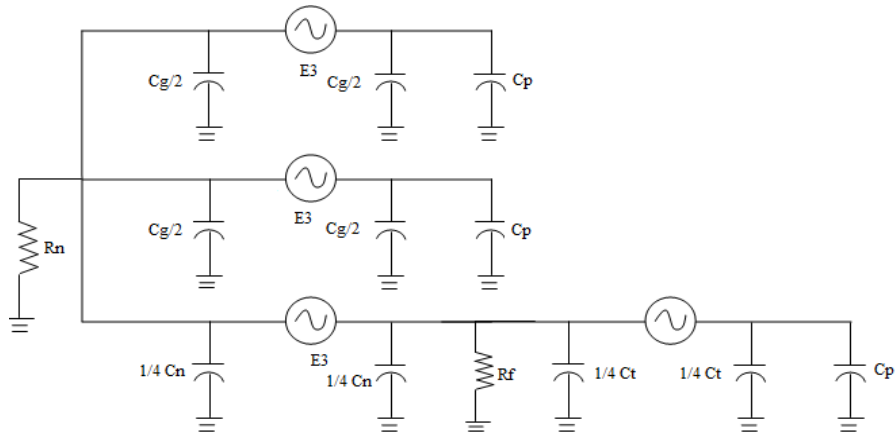


Figura 4.7 Modelo circuital equivalente del generador síncrono

C_n y C_t se representan matemáticamente con las ecuaciones 4.8 a 4.13. En este modelo equivalente, en la fase en falla, las capacitancias se dividen en dos modelos tipo pi en cascada, debido a que se representan mejor las variaciones de la tensión de tercer armónico.

$$C_n = K C_{\text{estator}} \quad (4.8)$$

$$C_t = (1-K)C_{\text{estator}} \quad (4.9)$$

$$E_{3n} = K E_3 \quad (4.10)$$

$$E_{3t} = (1-K)E_3 \quad (4.11)$$

$$C_{\text{estator}} = C_g + C_p \quad (4.12)$$

$$C_p = C_{\text{bus}} + C_{\text{surge}} + C_{\text{trafo}} \quad (4.13)$$

Donde,

- C_n : capacitancias con respecto al neutro.
- C_t : capacitancias con respecto al neutro.
- K : posición donde ocurre la falla en los devanados del estator.
- E_{3n} : tensión del tercer armónico en el neutro de la fase en falla.
- E_{3t} : tensión del tercer armónico en terminales de la fase en falla.
- C_{estator} : es la suma de C_g y C_p .
- C_g : capacitancia del estator a tierra.
- C_p : capacitancia de los equipos auxiliares.
- C_{bus} : capacitancia del bus.
- C_{surge} : capacitancia entre el transformador elevador y el interruptor.

Ctrafo: capacitancia del transformador auxiliar.

El circuito anterior se puede reducir usando el teorema de Millman [16], como se muestra a continuación en la figura 4.8:

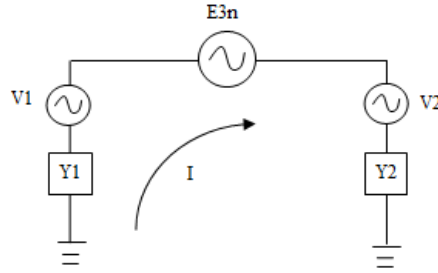


Figura 4.8 Circuito reducido por el teorema de Millman

Los parámetros del circuito de la figura 4.8 se obtienen por medio de las siguientes ecuaciones.

$$\overline{V}_1 = \frac{2 \pi f E_3 [C_g + 2C_p] i}{2 \pi f [C_g (2+K) + 2C_p] i + \frac{1}{R_n}} \quad (4.14)$$

$$\overline{Y}_1 = 2 \pi f [C_g (2+K) + 2C_p] i + \frac{1}{R_n} \quad (4.15)$$

$$\overline{V}_2 = \frac{2 \pi f E_3 [C_g (1-K) + 2C_p] (1-K) i}{2 \pi f [C_g (1-K) + C_p] + \frac{1}{R_f}} \quad (4.16)$$

$$\overline{Y}_2 = 2 \pi f [C_g (1-K) + C_p] i + \frac{1}{R_f} \quad (4.17)$$

$$I = \frac{(Y_2 Y_1)(V_1 - V_2 - K E_3)}{Y_1 + Y_2} \quad (4.18)$$

Partiendo de la figura 4.8 se puede obtener un equivalente del circuito, tal como se ilustra en la siguiente figura.

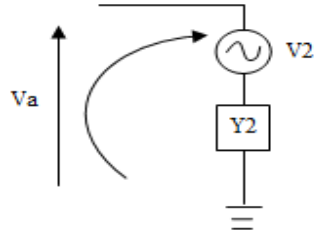


Figura 4.9 Circuito equivalente para calcular V_n y V_t

Para calcular V_n y V_t se emplean las ecuaciones descritas a continuación:

$$V_a = V_2 + I \left(\frac{1}{Y_2} \right) \quad (4.19)$$

$$V_n = V_1 - I \left(\frac{1}{Y_1} \right) + E_{3n} \quad (4.20)$$

$$V_t = V_a - (1-K) E_3 \quad (4.21)$$

4.1.3.3 Esquema de aterrizaje mediante alta resistencia de puesta a tierra

Para determinar el valor de la resistencia de aterrizaje se siguen los siguientes pasos:

- i. Recolectar y tabular los datos de los parámetros de los equipos que aportan el efecto capacitivo al modelo
- ii. Calcular la reactancia capacitiva total a tierra (X_c), vista desde el punto neutro del generador, a partir de la suma del efecto capacitivo de los equipos del sistema de conexión y del generador
- iii. Hallar la resistencia de aterrizaje R_n , siguiendo el criterio mostrado en la siguiente ecuación:

$$X_c \geq 3R_n \quad (4.22)$$

4.2 CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR SÍNCRONO SELECCIONADO

Para la implementación del modelo circuital basado en los voltajes y corrientes del tercer armónico se considera un generador síncrono con las características descritas en la siguiente tabla [16].

Tabla 4.1 Características del generador síncrono seleccionado

DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	CARACTERÍSTICA
Potencia nominal	S_n	850 [MVA]
Velocidad síncrona	W	3000 [rpm]
Frecuencia de operación	f_o	50 [Hz]
Tensión nominal	U_n	11.4 [kV]
Reactancia síncrona	X_d	2.44 [p.u]
Reactancia transitoria	X'_d	0.43 [p.u]
Reactancia subtransitoria	X''_d	0.25 [p.u]
Reactancia de secuencia cero	X_0	0.13 [p.u]
Reactancia de secuencia negativa	X_2	0.24 [p.u]
Resistencia de secuencia cero	R_0	0.0025 [p.u]
Resistencia de secuencia positiva	R_1	0.0034 [p.u]
Resistencia de secuencia negativa	R_2	0.04 [p.u]
Resistencia de aislamiento	R_a	10 [M Ω]
Capacitancia a tierra del estator del generador	C_g	0.385 [μ F/fase]
Factor de potencia	F_p	0.882 (en atraso)
Capacitancia del bus	C_{bus}	1887 [pF/fase]
Capacitancia entre el transformador elevador y el interruptor	C_{surge}	0.129 [μ F/fase]
Capacitancia del transformador auxiliar	C_{trafo}	1092 [pF/fase]
Efecto capacitivo total aportado por los equipos*	C_p	0.132 [μ F/fase]
Resistencia de aterrizaje **	R_n	2052.3 [Ω]
Tipo de generador	-----	Rotor cilíndrico
Relación de transformación de los TCs	RTC	15000/5

* Este valor fue calculado con la ecuación (4.13).

** Este valor fue calculado con la ecuación (4.22).

4.3 MODELO DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL

La protección diferencial tiene como propósito detectar fallas internas en el generador síncrono, mediante la comparación entre las corrientes primarias y secundarias del equipo protegido. Esta protección es usada comúnmente contra fallos en los devanados del estator. La mayoría de estas fallas son monofásicas, cuyas magnitudes de corriente dependen del tipo de aterrizaje.

4.3.1 Protección diferencial en operación normal

Bajo condiciones de operación normal las corrientes vistas en el secundario de los TC's teóricamente son iguales, lo que ocasiona que la corriente diferencial (I_d) sea igual a cero, y por lo tanto que el relé de protección no opere.

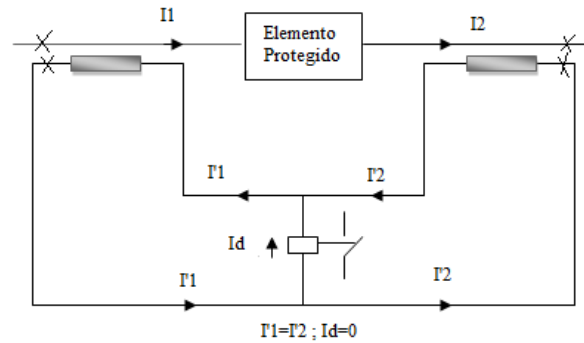


Figura 4.10 Protección diferencial

Del circuito anterior se puede observar que:

$$I_d = I'_1 - I'_2 = 0 = K_1 I_1 - K_2 I_2 \quad (4.23)$$

Donde,

- I_d : corriente diferencial del relé.
- I_1 : corriente que circula por el elemento protegido.
- I_2 : corriente que circula por el elemento protegido.
- I'_1 : corriente que circula por el TC₁.
- I'_2 : corriente que circula por el TC₂.
- K_1 : relación de transformación del TC₁.
- K_2 : relación de transformación del TC₂.

4.3.2 Protección diferencial en operación bajo falla

Para una falla línea-tierra en el estator, el circuito diferencial está siempre recorrido por la corriente de falla, dado que el único elemento que contribuye a esta es el generador, tal como se muestra en la figura 4.11 [9].

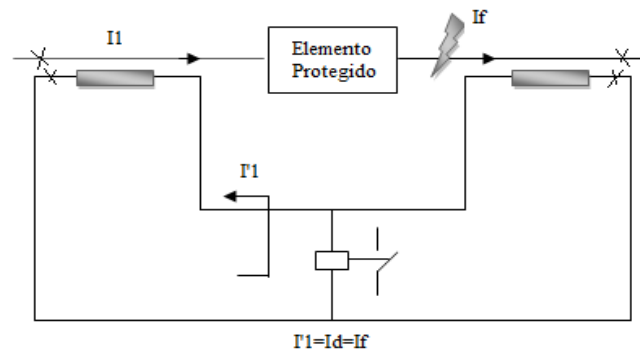


Figura 4.11 Falla interna

Del circuito anterior se puede observar que:

$$I_d = I_f \quad (4.24)$$

Donde I_d es la corriente diferencial del relé e I_f es la corriente de falla.

4.4 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS DATOS EMPLEADOS POR LA RNA

Para la implementación de la RNA fue necesario obtener los valores de corrientes en el neutro y en terminales del generador síncrono bajo operación normal y bajo fallas fase-tierra. Se decidió emplear este tipo de fallas debido a que es objeto de estudio por su mayor ocurrencia y su difícil detección para sistemas de aterrizaje de alta resistencia a tierra. Estos valores se obtuvieron a través de la herramienta Simulink de Matlab [17]. Los circuitos empleados se observan en las figuras 4.12 y 4.13.

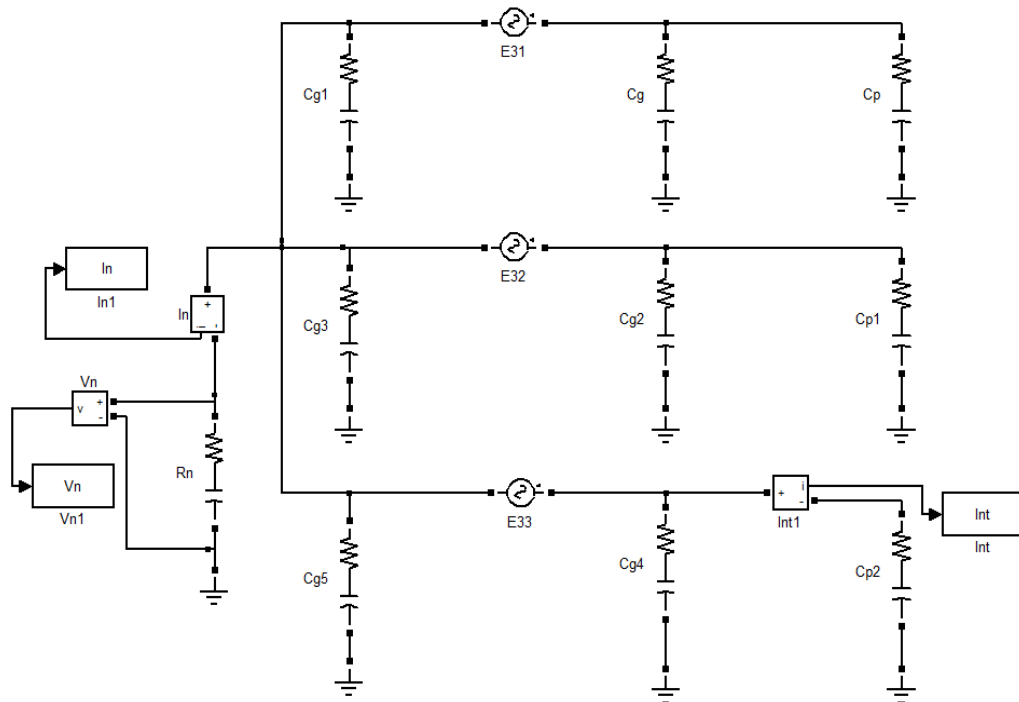


Figura 4.12 Modelo equivalente circuital del generador síncrono en operación normal

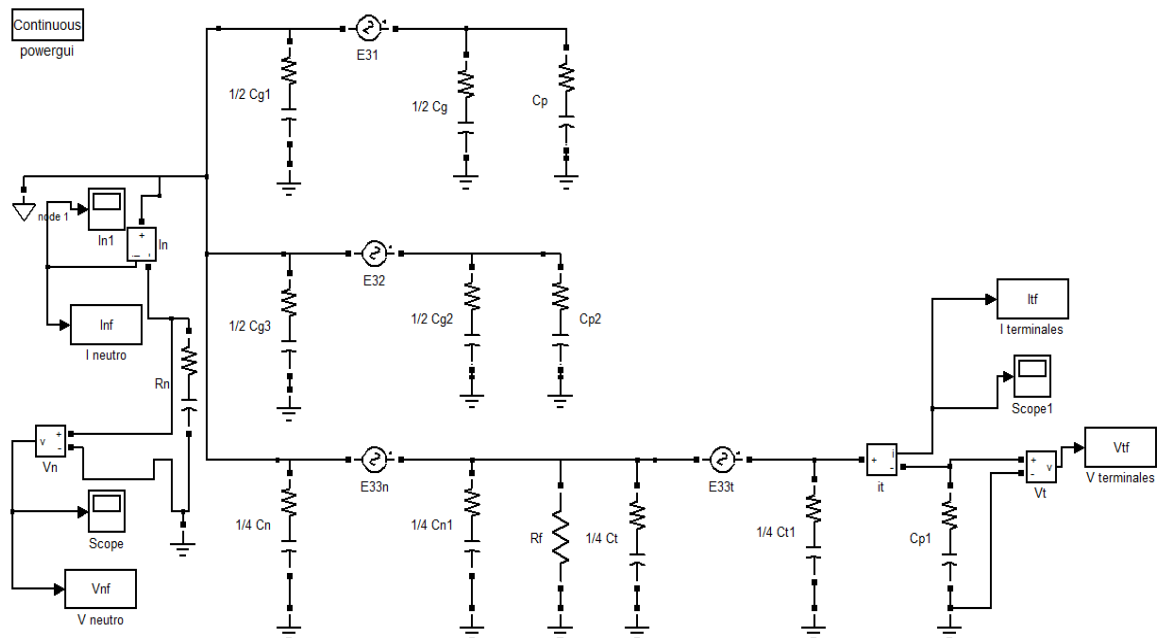


Figura 4.13 Modelo equivalente circuital del generador síncrono en operación bajo falla

A continuación se ilustran los pasos necesarios para obtener los datos de entrenamiento y prueba empleados por la RNA, bajo condiciones de operación normal y bajo falla.

4.4.1 Determinación de la resistencia de aterrizaje

Este valor debe ser calculado y tenido en cuenta en el proceso, debido al efecto capacitivo aportado por la capacitancia de los equipos y del estator a tierra. Para obtenerlo se emplean las siguientes ecuaciones:

$$X_{\text{estator}} = \frac{1}{W C_{\text{estator}}} \quad (4.25)$$

La reactancia total vista por cada fase esta dada por la siguiente ecuación:

$$X_c = \frac{1}{3} X_{\text{estator}} \quad (4.26)$$

Donde W es la frecuencia angular y X_{estator} es la reactancia capacitiva del estator a tierra. Con este valor se obtiene la resistencia de aterrizaje, debido a que $R_n = X_c$.

4.4.2 Determinación de la impedancia de fase y del neutro

Las impedancias para el modelo en operación normal son calculadas a partir de las ecuaciones enunciadas en el numeral 4.1.3.1.

4.4.3 Determinación de las corrientes de operación normal y bajo fallo

A partir de las simulaciones realizadas en Simulink de Matlab (figuras 4.12 y 4.13), son obtenidas las corrientes en el neutro, en la fase y por el relé (diferencial) para condición normal y bajo falla por medio de las ecuaciones 4.23 y 4.24, respectivamente.

4.4.3.1 Modelo bajo condiciones normales de operación

Bajo esta condición, la cargabilidad se varió en un rango del 1% al 6% de la tensión nominal del generador, con pasos de 1.6667×10^{-4} , para obtener un total de 300 muestras.

Las simulaciones se hicieron con pasos de tiempo de 0.03 segundos. En la siguiente tabla se muestran los parámetros que se tuvieron en cuenta.

Tabla 4.2 Parámetros y nomenclatura

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	VALOR
E_3	Tensión de tercer armónico de las fases A, B y C	Variable	1% al 6%
C_p	Efecto capacitivo total aportado por los equipos	Constante	0.1320 [$\mu\text{F}/\text{fase}$]
C_g	Efecto capacitivo del estator	Constante	0.385 [$\mu\text{F}/\text{fase}$]
R_n	Resistencia de aterrizaje	Constante	2052.3 [Ω]
Z_n	Impedancia del neutro	Constante	$0.667 \angle 41.84^\circ [\Omega]$
Z_t	Impedancia del terminal	Constante	$3269.74 \angle 90^\circ [\Omega]$

4.4.3.2 Modelo bajo condiciones de falla

Bajo esta condición se tuvieron las siguientes consideraciones: la aplicación de la falla fase tierra se realizó en la fase C, la cargabilidad se varió en un rango del 1% al 6%, con pasos de 1.6667×10^{-3} , la posición de la falla se consideró entre el 0% y el 10% del devanado del estator, con pasos de 1%, por lo tanto, para cada valor de cargabilidad se obtuvieron 10 datos de posiciones de falla. La resistencia de falla se consideró constante para cada una de las pruebas (es decir, un valor de resistencia de falla por cada caso). Se realizaron un total de 300 simulaciones para cada uno de los cinco casos de prueba.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros que se tuvieron en cuenta en las simulaciones bajo falla.

Tabla 4.3 Parámetros y nomenclatura

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	VALOR	
E_3	Tensión de tercer armónico de las fases A y B	Variable	1% al 6%	
E_{3n}	Tensión del tercer armónico en el neutro	Variable	$E_{3n} = K E_3$	
E_{3t}	Tensión del tercer armónico en terminales de la fase fallada	Variable	$E_{3t} = (1-K)E_3$	
C_g	Capacitancia a tierra del estator del generador	Constante	0.385 [μ F/fase]	
C_p	Efecto capacitivo total aportado por los equipos	Constante	0.132 [μ F/fase]	
R_n	Resistencia de aterrizaje	Constante	2052.3 [Ω]	
C_n	Capacitancia respecto al neutro	Variable	$C_n = K C_{estator}$	
C_t	Capacitancia respecto al terminal	Variable	$C_t = (1-K)C_{estator}$	
R_f	Resistencia de falla	Constante	Caso 1	1 [Ω]
			Caso 2	100 [Ω]
			Caso 3	1000 [Ω]
			Caso 4	3000 [Ω]
			Caso 5	5000 [Ω]
k	Posición de la falla	Variable	1% al 10%	

4.5 ARQUITECTURA DE LA RED NEURONAL

Como se aprecia en la figura 4.14, la entrada a la red es la corriente diferencial de la protección, la cual fue calculada a partir de las corrientes tomadas en el neutro y en los terminales del circuito equivalente simulado, con el fin de entrenar la red con rasgos distintivos de las corrientes diferenciales de la protección para el generador en operación normal y bajo falla.

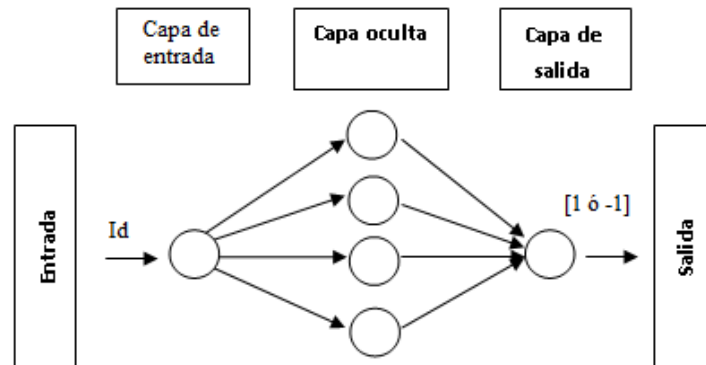


Figura 4.14 Arquitectura de la red neuronal

Por ensayo y error, y después de haber realizado varias pruebas, se determinó el número de neuronas en la capa oculta hasta bajo la cual la red se comportó adecuadamente.

Se seleccionó una RNA Backpropagation, la cual está diseñada con tres capas, todas con una función de transferencia tangencial hiperbólica. La primera capa (capa de entrada) tiene una neurona, la segunda capa (capa oculta) posee cuatro neuronas y la última capa (capa de salida) cuenta con una neurona cuya respuesta puede ser -1 (operación falla) ó 1 (operación normal). De acuerdo a esto, una salida de -1 permite la operación de la protección diferencial del generador y una salida de 1 bloquea la protección diferencial para evitar una operación incorrecta. Las corrientes de entrada no necesitan normalización debido a que se encuentran en este rango. El proceso de entrenamiento se interrumpe cuando el error medio cuadrático es menor que la tolerancia.

El conjunto de patrones de las simulaciones para entrenar la red neuronal se seleccionó aleatoriamente a partir de 600 muestras para cada caso de prueba (300 de operación normal y 300 bajo falla). Se empleó como algoritmo de entrenamiento el algoritmo Levenberg-Marquadt, el cual se implementó utilizando el Neural Network Toolbox de MATLAB [19], con un error máximo admisible de 1×10^{-11} . Los pesos iniciales de la red fueron seleccionados aleatoriamente cumpliendo con el criterio de que los W_{ij} estén entre cero y uno [13].

En la tabla 4.4 se presentan los valores considerados en el entrenamiento de la red neuronal.

Tabla 4.4 Características de la RNA

DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICA
Capa de entrada	1 neurona
Capa oculta	Una capa con cuatro neuronas
Capa de salida	1 neurona
Pesos (W_{ij})	Dimensión $[4 \times 1]$ y $[1 \times 4]$ para las capas oculta y de salida, respectivamente
Tipo de RNA	Backpropagation
Algoritmo de entrenamiento	Levenberg-Marquadt
Error máximo admisible	1×10^{-11}

Una vez obtenidas las muestras de corrientes entrantes y salientes del generador síncrono en la simulación en operación normal y bajo falla, se calculan las corrientes diferenciales respectivamente las cuales se dividen en dos grupos: uno para entrenamiento de la red neuronal y el otro para obtener las pruebas de la red, tal como se muestra en la tabla 4.5. Se realizaron cinco casos de prueba para observar el comportamiento de la red neuronal en respuesta ante diferentes valores de resistencias de falla.

Tabla 4.5 Datos de las simulaciones para cada caso de prueba

SIMULACIONES		CANTIDAD	
Operación normal	Entrenamiento	270	
	Prueba	30	
Operación bajo falla	Caso 1	Entrenamiento	270
		Prueba	30
	Caso 2	Entrenamiento	270
		Prueba	30
	Caso 3	Entrenamiento	270
		Prueba	30
	Caso 4	Entrenamiento	270
		Prueba	30
	Caso 5	Entrenamiento	270
		Prueba	30

Las muestras fueron reordenadas aleatoriamente mediante la función shuffle para una mejor generalización de la red [17].

4.6 RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado se ilustra el comportamiento de la red ante cinco casos de prueba diferentes. Debido a la cantidad de datos de entrenamiento empleados, estos se presentan en el Anexo.

4.6.1 Caso de prueba 1

Esta prueba se realizó para una resistencia de falla de 1Ω y con las características ya mencionadas en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4. En las tablas 4.6 y 4.7 se presentan los valores de prueba bajo condiciones de operación y bajo falla, respectivamente.

Tabla 4.6 Respuesta del caso 1 en operación normal

MUESTRA	ENTRADA	SALIDA DESEADA	SALIDA OBTENIDA	ERROR	COMPORTAMIENTO DE LA RED
1	0,00411357	1	1,00008976	8,98E-05	ADECUADO
2	0,00360166	1	1,00006354	6,35E-05	ADECUADO
3	0,00542991	1	1,00017773	1,78E-04	ADECUADO
4	0,00599667	1	1,00018149	1,81E-04	ADECUADO
5	0,00647201	1	1,00009316	9,32E-05	ADECUADO
6	0,00206592	1	1,00002051	2,05E-05	ADECUADO
7	0,00358337	1	1,00006274	6,27E-05	ADECUADO
8	0,00577728	1	1,000188	1,88E-04	ADECUADO
9	0,00109695	1	1,00000957	9,57E-06	ADECUADO
10	0,00204764	1	1,00002022	2,02E-05	ADECUADO
11	0,00581384	1	1,00018783	1,88E-04	ADECUADO
12	0,00396731	1	1,00008153	8,15E-05	ADECUADO
13	0,00296177	1	1,00004019	4,02E-05	ADECUADO
14	0,00290692	1	1,0000386	3,86E-05	ADECUADO
15	0,00552132	1	1,00018206	1,82E-04	ADECUADO
16	0,0055396	1	1,00018281	1,83E-04	ADECUADO
17	0,00332742	1	1,00005237	5,24E-05	ADECUADO
18	0,00575899	1	1,00018797	1,88E-04	ADECUADO
19	0,00351024	1	1,00005961	5,96E-05	ADECUADO
20	0,00323601	1	1,00004904	4,90E-05	ADECUADO
21	0,0033457	1	1,00005305	5,31E-05	ADECUADO
22	0,00305318	1	1,00004296	4,30E-05	ADECUADO
23	0,00422326	1	1,00009632	9,63E-05	ADECUADO
24	0,00144432	1	1,00001264	1,26E-05	ADECUADO
25	0,00427811	1	1,00009972	9,97E-05	ADECUADO
26	0,00489972	1	1,00014266	1,43E-04	ADECUADO
27	0,00400387	1	1,00008353	8,35E-05	ADECUADO
28	0,00436952	1	1,00010557	1,06E-04	ADECUADO
29	0,00464376	1	1,00012423	1,24E-04	ADECUADO
30	0,00363822	1	1,00006518	6,52E-05	ADECUADO

Tabla 4.7 Respuesta del caso 1 en operación bajo falla

MUESTRA	ENTRADA	SALIDA DESEADA	SALIDA OBTENIDA	ERROR	COMPORTAMIENTO DE LA RED
1	0,11262184	-1	-0,99999551	4,49E-06	ADECUADO
2	0,08674127	-1	-0,99999768	2,32E-06	ADECUADO
3	0,0220421	-1	-1,00003478	3,48E-05	ADECUADO
4	0,11085581	-1	-0,99999566	4,34E-06	ADECUADO
5	0,08538122	-1	-0,9999978	2,20E-06	ADECUADO
6	0,02169655	-1	-1,00004422	4,42E-05	ADECUADO
7	0,10909906	-1	-0,99999581	4,19E-06	ADECUADO
8	0,0840285	-1	-0,99999791	2,09E-06	ADECUADO
9	0,02135263	-1	-1,00005638	5,64E-05	ADECUADO
10	0,10735339	-1	-0,99999595	4,05E-06	ADECUADO
11	0,08268449	-1	-0,99999803	1,97E-06	ADECUADO
12	0,02101112	-1	-1,00007196	7,20E-05	ADECUADO
13	0,10562067	-1	-0,9999961	3,90E-06	ADECUADO
14	0,08134975	-1	-0,99999814	1,86E-06	ADECUADO
15	0,02067187	-1	-1,00009184	9,18E-05	ADECUADO
16	0,10390002	-1	-0,99999624	3,76E-06	ADECUADO
17	0,08002415	-1	-0,99999825	1,75E-06	ADECUADO
18	0,02033512	-1	-1,00011704	1,17E-04	ADECUADO
19	0,07283834	-1	-0,99999887	1,13E-06	ADECUADO
20	0,07870959	-1	-0,99999837	1,63E-06	ADECUADO
21	0,05229069	-1	-1,00000072	7,15E-07	ADECUADO
22	0,07163208	-1	-0,99999898	1,02E-06	ADECUADO
23	0,07740561	-1	-0,99999848	1,52E-06	ADECUADO
24	0,05142446	-1	-1,00000008	7,96E-07	ADECUADO
25	0,07043623	-1	-0,99999908	9,19E-07	ADECUADO
26	0,07611398	-1	-0,99999859	1,41E-06	ADECUADO
27	0,0505663	-1	-1,00000088	8,76E-07	ADECUADO
28	0,06925301	-1	-0,99999918	8,15E-07	ADECUADO
29	0,07483482	-1	-0,9999987	1,30E-06	ADECUADO
30	0,04971626	-1	-1,00000096	9,56E-07	ADECUADO

En las figuras 4.15 y 4.16 se observa el comportamiento de la RNA bajo condiciones de operación normal y bajo falla, respectivamente.

Figura 4.15 Respuesta del caso 1 en operación normal

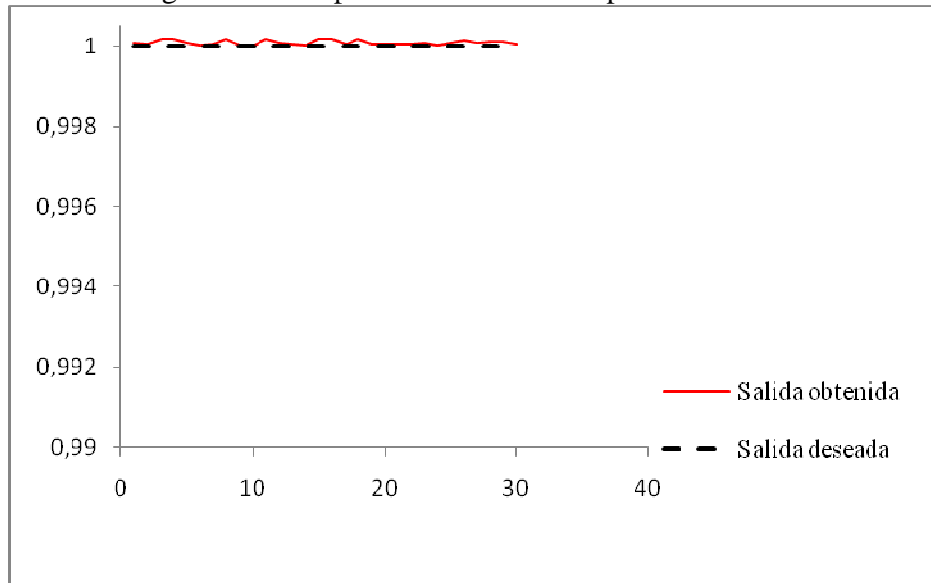
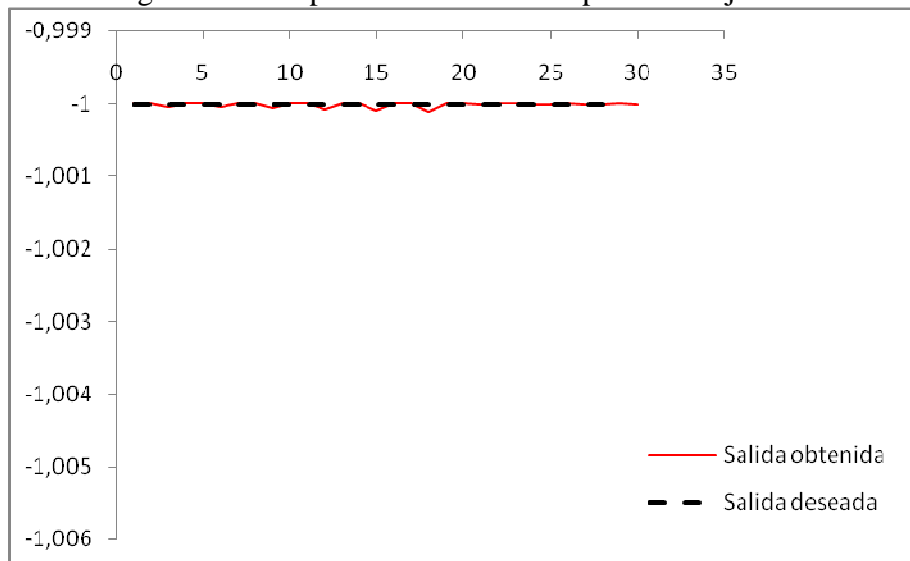


Figura 4.16 Respuesta del caso 1 en operación bajo falla



4.6.2 Caso de prueba 2

Esta prueba se realizó para una resistencia de falla de 100Ω y con las características ya mencionadas en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4. En las tablas 4.8 y 4.9 se presentan los valores de prueba bajo condiciones de operación y bajo falla, respectivamente.

Tabla 4.8 Respuesta del caso 2 en operación normal

MUESTRA	ENTRADA	SALIDA DESEADA	SALIDA OBTENIDA	ERROR	COMPORTAMIENTO DE LA RED
1	0,00111523	1	1,00009315	9,31E-05	ADECUADO
2	0,00511911	1	1,0001441	1,44E-04	ADECUADO
3	0,00144432	1	1,00009334	9,33E-05	ADECUADO
4	0,00532021	1	1,00015093	1,51E-04	ADECUADO
5	0,00541163	1	1,00015386	1,54E-04	ADECUADO
6	0,00413185	1	1,00011528	1,15E-04	ADECUADO
7	0,00656343	1	1,00010027	1,00E-04	ADECUADO
8	0,00612464	1	1,00015685	1,57E-04	ADECUADO
9	0,00619777	1	1,00015259	1,53E-04	ADECUADO
10	0,00133462	1	1,00009325	9,32E-05	ADECUADO
11	0,004918	1	1,00013725	1,37E-04	ADECUADO
12	0,00586869	1	1,0001625	1,63E-04	ADECUADO
13	0,00202936	1	1,00009434	9,43E-05	ADECUADO
14	0,00276066	1	1,0000975	9,75E-05	ADECUADO
15	0,00572243	1	1,00016142	1,61E-04	ADECUADO
16	0,00643545	1	1,00012595	1,26E-04	ADECUADO
17	0,0063806	1	1,0001342	1,34E-04	ADECUADO
18	0,0056493	1	1,00016013	1,60E-04	ADECUADO
19	0,00431467	1	1,00011952	1,20E-04	ADECUADO
20	0,00577728	1	1,00016209	1,62E-04	ADECUADO
21	0,00369307	1	1,00010718	1,07E-04	ADECUADO
22	0,00594182	1	1,00016207	1,62E-04	ADECUADO
23	0,00308975	1	1,0001	1,00E-04	ADECUADO
24	0,00630747	1	1,00014308	1,43E-04	ADECUADO
25	0,00299833	1	1,00009922	9,92E-05	ADECUADO
26	0,00555789	1	1,00015803	1,58E-04	ADECUADO
27	0,00416841	1	1,00011608	1,16E-04	ADECUADO
28	0,00184653	1	1,00009392	9,39E-05	ADECUADO
29	0,00537506	1	1,00015271	1,53E-04	ADECUADO
30	0,004077	1	1,00011411	1,14E-04	ADECUADO

Tabla 4.9 Respuesta del caso 2 en operación bajo falla

MUESTRA	ENTRADA	SALIDA DESEADA	SALIDA OBTENIDA	ERROR	COMPORTAMIENTO DE LA RED
1	0,10431872	-1	-1,00000145	1,45E-06	ADECUADO
2	0,01848261	-1	-1,0000307	3,07E-05	ADECUADO
3	0,05345005	-1	-0,99999931	6,90E-07	ADECUADO
4	0,10268105	-1	-1,00000135	1,35E-06	ADECUADO
5	0,01819208	-1	-1,00003924	3,92E-05	ADECUADO
6	0,05261174	-1	-0,99999928	7,17E-07	ADECUADO
7	0,10104343	-1	-1,00000126	1,26E-06	ADECUADO
8	0,01790226	-1	-1,00004906	4,91E-05	ADECUADO
9	0,05177332	-1	-0,99999926	7,45E-07	ADECUADO
10	0,09940941	-1	-1,00000118	1,18E-06	ADECUADO
11	0,0176115	-1	-1,0000597	5,97E-05	ADECUADO
12	0,05093406	-1	-0,99999923	7,72E-07	ADECUADO
13	0,09778012	-1	-1,00000109	1,09E-06	ADECUADO
14	0,0173227	-1	-1,00006972	6,97E-05	ADECUADO
15	0,05009844	-1	-0,9999992	8,00E-07	ADECUADO
16	0,06392873	-1	-0,99999966	3,42E-07	ADECUADO
17	0,09029927	-1	-1,00000072	7,17E-07	ADECUADO
18	0,07271915	-1	-0,99999997	2,61E-08	ADECUADO
19	0,06285984	-1	-0,99999962	3,78E-07	ADECUADO
20	0,08879291	-1	-1,00000065	6,46E-07	ADECUADO
21	0,07150369	-1	-0,99999993	7,16E-08	ADECUADO
22	0,06180121	-1	-0,99999959	4,14E-07	ADECUADO
23	0,08729659	-1	-1,00000058	5,78E-07	ADECUADO
24	0,07029967	-1	-0,99999988	1,16E-07	ADECUADO
25	0,06075233	-1	-0,99999955	4,49E-07	ADECUADO
26	0,08581503	-1	-1,00000051	5,11E-07	ADECUADO
27	0,06910613	-1	-0,99999984	1,59E-07	ADECUADO
28	0,05971221	-1	-0,99999952	4,84E-07	ADECUADO
29	0,0843473	-1	-1,00000045	4,46E-07	ADECUADO
30	0,06792388	-1	-0,9999998	2,02E-07	ADECUADO

En las figuras 4.17 y 4.18 se observa el comportamiento de la RNA bajo condiciones de operación normal y bajo falla, respectivamente.

Figura 4.17 Respuesta del caso 2 en operación normal

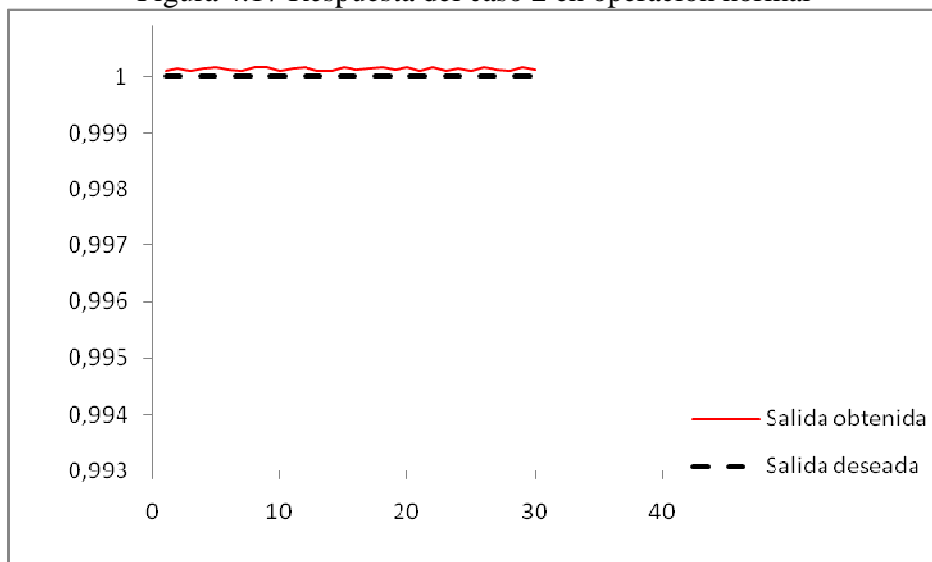
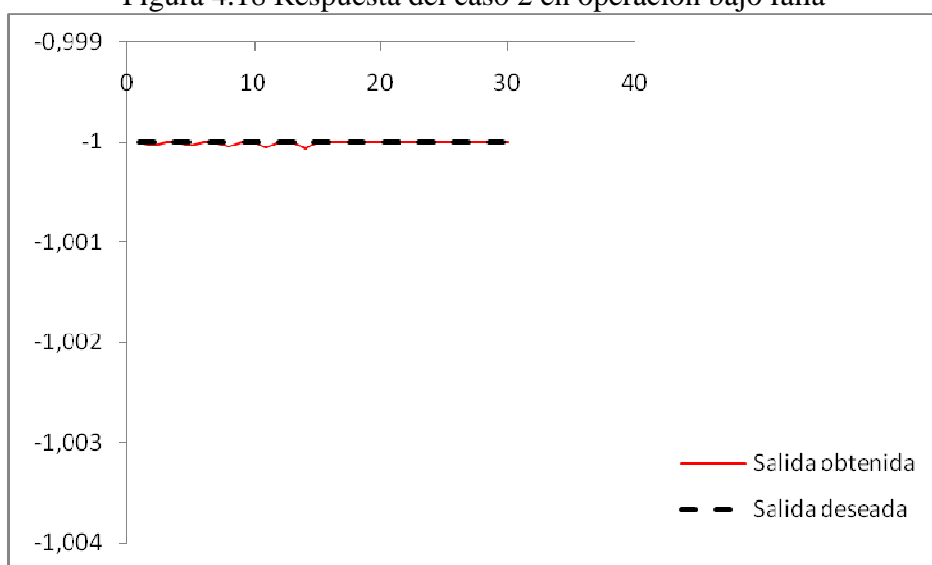


Figura 4.18 Respuesta del caso 2 en operación bajo falla



4.6.3 Caso de prueba 3

Esta prueba se realizó para una resistencia de falla de 1000Ω y con las características ya mencionadas en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4. En las tablas 4.10 y 4.11 se presentan los valores de prueba bajo condiciones de operación y bajo falla, respectivamente.

Tabla 4.10 Respuesta del caso 3 en operación normal

MUESTRA	ENTRADA	SALIDA DESEADA	SALIDA OBTENIDA	ERROR	COMPORTAMIENTO DE LA RED
1	0,00515567	1	1,00006418	6,42E-05	ADECUADO
2	0,00173684	1	1,00006949	6,95E-05	ADECUADO
3	0,00656343	1	0,9999169	8,31E-05	ADECUADO
4	0,00193795	1	1,00006925	6,93E-05	ADECUADO
5	0,00204764	1	1,00006913	6,91E-05	ADECUADO
6	0,00113351	1	1,0000702	7,02E-05	ADECUADO
7	0,00298005	1	1,00006805	6,81E-05	ADECUADO
8	0,0043878	1	1,00006636	6,64E-05	ADECUADO
9	0,00124321	1	1,00007007	7,01E-05	ADECUADO
10	0,00151745	1	1,00006975	6,97E-05	ADECUADO
11	0,0025047	1	1,0000686	6,86E-05	ADECUADO
12	0,00237673	1	1,00006875	6,87E-05	ADECUADO
13	0,00111523	1	1,00007022	7,02E-05	ADECUADO
14	0,0055396	1	1,00006009	6,01E-05	ADECUADO
15	0,00383933	1	1,00006707	6,71E-05	ADECUADO
16	0,00367479	1	1,00006726	6,73E-05	ADECUADO
17	0,0018831	1	1,00006932	6,93E-05	ADECUADO
18	0,00614293	1	1,0000275	2,75E-05	ADECUADO
19	0,00636232	1	0,99998821	1,18E-05	ADECUADO
20	0,00422326	1	1,00006659	6,66E-05	ADECUADO
21	0,0037662	1	1,00006715	6,72E-05	ADECUADO
22	0,00502769	1	1,00006482	6,48E-05	ADECUADO
23	0,00415013	1	1,00006669	6,67E-05	ADECUADO
24	0,00634404	1	0,99999266	7,34E-06	ADECUADO
25	0,00232188	1	1,00006881	6,88E-05	ADECUADO
26	0,00255955	1	1,00006854	6,85E-05	ADECUADO
27	0,00621606	1	1,00001737	1,74E-05	ADECUADO
28	0,00170027	1	1,00006953	6,95E-05	ADECUADO
29	0,00603323	1	1,00003882	3,88E-05	ADECUADO
30	0,00404044	1	1,00006682	6,68E-05	ADECUADO

Tabla 4.11 Respuesta del caso 3 en operación bajo falla

MUESTRA	ENTRADA	SALIDA DESEADA	SALIDA OBTENIDA	ERROR	COMPORTAMIENTO DE LA RED
1	0,06370907	-1	-0,99996181	3,82E-05	ADECUADO
2	0,04890099	-1	-0,99995614	4,39E-05	ADECUADO
3	0,05630451	-1	-0,99995919	4,08E-05	ADECUADO
4	0,06257272	-1	-0,99996143	3,86E-05	ADECUADO
5	0,04802875	-1	-0,99995575	4,43E-05	ADECUADO
6	0,05530066	-1	-0,9999588	4,12E-05	ADECUADO
7	0,044781	-1	-0,99995423	4,58E-05	ADECUADO
8	0,03764058	-1	-0,99995052	4,95E-05	ADECUADO
9	0,01859883	-1	-0,99993752	6,25E-05	ADECUADO
10	0,04396117	-1	-0,99995383	4,62E-05	ADECUADO
11	0,03695135	-1	-0,99995013	4,99E-05	ADECUADO
12	0,01825819	-1	-0,99993723	6,28E-05	ADECUADO
13	0,04314628	-1	-0,99995343	4,66E-05	ADECUADO
14	0,03626625	-1	-0,99994974	5,03E-05	ADECUADO
15	0,01791982	-1	-0,99993695	6,30E-05	ADECUADO
16	0,04233598	-1	-0,99995302	4,70E-05	ADECUADO
17	0,0355852	-1	-0,99994935	5,07E-05	ADECUADO
18	0,01758326	-1	-0,99993667	6,33E-05	ADECUADO
19	0,04153164	-1	-0,99995261	4,74E-05	ADECUADO
20	0,03490887	-1	-0,99994895	5,10E-05	ADECUADO
21	0,01724902	-1	-0,99993639	6,36E-05	ADECUADO
22	0,04722771	-1	-0,99995538	4,46E-05	ADECUADO
23	0,06671312	-1	-0,99996277	3,72E-05	ADECUADO
24	0,02774258	-1	-0,99994439	5,56E-05	ADECUADO
25	0,046309	-1	-0,99995496	4,50E-05	ADECUADO
26	0,06541488	-1	-0,99996236	3,76E-05	ADECUADO
27	0,02720293	-1	-0,99994402	5,60E-05	ADECUADO
28	0,0453993	-1	-0,99995453	4,55E-05	ADECUADO
29	0,06412989	-1	-0,99996195	3,80E-05	ADECUADO
30	0,02666816	-1	-0,99994365	5,63E-05	ADECUADO

En las figuras 4.19 y 4.20 se observa el comportamiento de la RNA bajo condiciones de operación normal y bajo falla, respectivamente.

Figura 4.19 Respuesta del caso 3 en operación normal

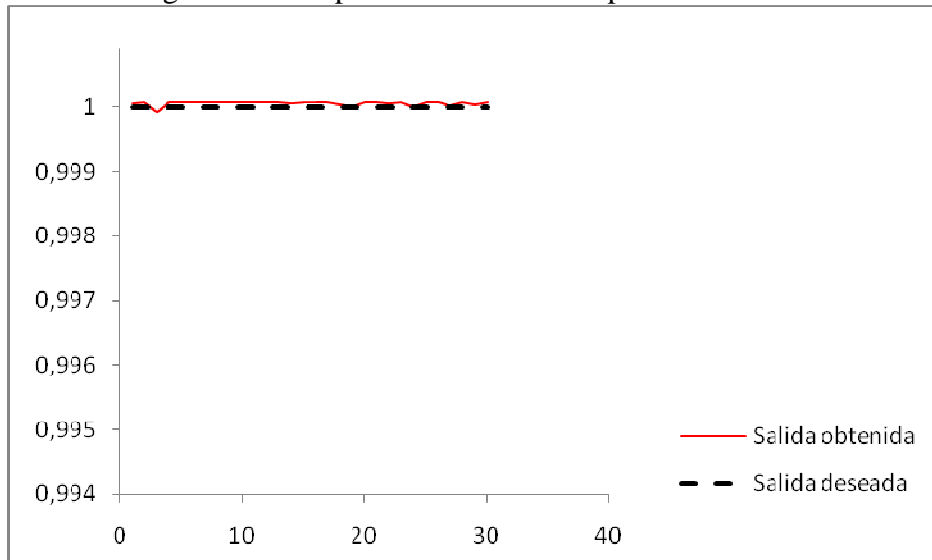
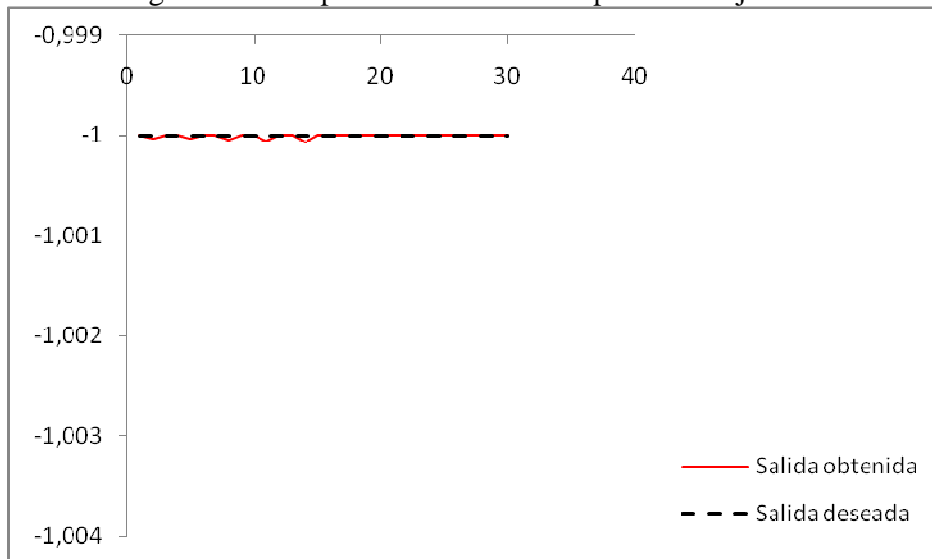


Figura 4.20 Respuesta del caso 3 en operación bajo falla



4.6.4 Caso de prueba 4

Esta prueba se realizó para una resistencia de falla de 3000Ω y con las características ya mencionadas en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4. En las tablas 4.12 y 4.13 se presentan los valores de prueba bajo condiciones de operación y bajo falla, respectivamente.

Tabla 4.12 Respuesta del caso 4 en operación normal

MUESTRA	ENTRADA	SALIDA DESEADA	SALIDA OBTENIDA	ERROR	COMPORTAMIENTO DE LA RED
1	0,00372963	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
2	0,00109695	1	0,99980652	1,93E-04	ADECUADO
3	0,00343711	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
4	0,00539334	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
5	0,00552132	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
6	0,00349196	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
7	0,00495456	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
8	0,00656343	1	0,99970759	2,92E-04	ADECUADO
9	0,00352853	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
10	0,0026144	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
11	0,00521052	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
12	0,00630747	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
13	0,00142604	1	0,99980652	1,93E-04	ADECUADO
14	0,00144432	1	0,99980652	1,93E-04	ADECUADO
15	0,00287035	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
16	0,00138947	1	0,99980652	1,93E-04	ADECUADO
17	0,00625262	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
18	0,00634404	1	0,99980669	1,93E-04	ADECUADO
19	0,0025047	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
20	0,00466204	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
21	0,00288864	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
22	0,00563102	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
23	0,0013529	1	0,99980652	1,93E-04	ADECUADO
24	0,00248642	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
25	0,00164543	1	0,99980652	1,93E-04	ADECUADO
26	0,00477174	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
27	0,00457063	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
28	0,00361994	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
29	0,00266925	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO
30	0,00191966	1	0,99980653	1,93E-04	ADECUADO

Tabla 4.13 Respuesta del caso 4 en operación bajo falla

MUESTRA	ENTRADA	SALIDA DESEADA	SALIDA OBTENIDA	ERROR	COMPORTAMIENTO DE LA RED
1	0,02533738	-1	-1,00031147	3,11E-04	ADECUADO
2	0,00917607	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
3	0,01052273	-1	-1,00031149	3,11E-04	ADECUADO
4	0,02483313	-1	-1,00031147	3,11E-04	ADECUADO
5	0,00899337	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
6	0,01031322	-1	-1,00031149	3,11E-04	ADECUADO
7	0,02432868	-1	-1,00031147	3,11E-04	ADECUADO
8	0,00881076	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
9	0,0101038	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
10	0,02382435	-1	-1,00031147	3,11E-04	ADECUADO
11	0,00862816	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
12	0,00989441	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
13	0,02332015	-1	-1,00031147	3,11E-04	ADECUADO
14	0,00844552	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
15	0,00968496	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
16	0,022816	-1	-1,00031147	3,11E-04	ADECUADO
17	0,00826295	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
18	0,00947561	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
19	0,02231188	-1	-1,00031148	3,11E-04	ADECUADO
20	0,00808034	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
21	0,00926619	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
22	0,02180775	-1	-1,00031148	3,11E-04	ADECUADO
23	0,00789781	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
24	0,00905688	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
25	0,02130374	-1	-1,00031148	3,11E-04	ADECUADO
26	0,00771532	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
27	0,0088476	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
28	0,02079986	-1	-1,00031148	3,11E-04	ADECUADO
29	0,00753283	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO
30	0,00863833	-1	-1,0003115	3,11E-04	ADECUADO

En las figuras 4.21 y 4.22 se observa el comportamiento de la RNA bajo condiciones de operación normal y bajo falla, respectivamente.

Figura 4.21 Respuesta del caso 4 en operación normal

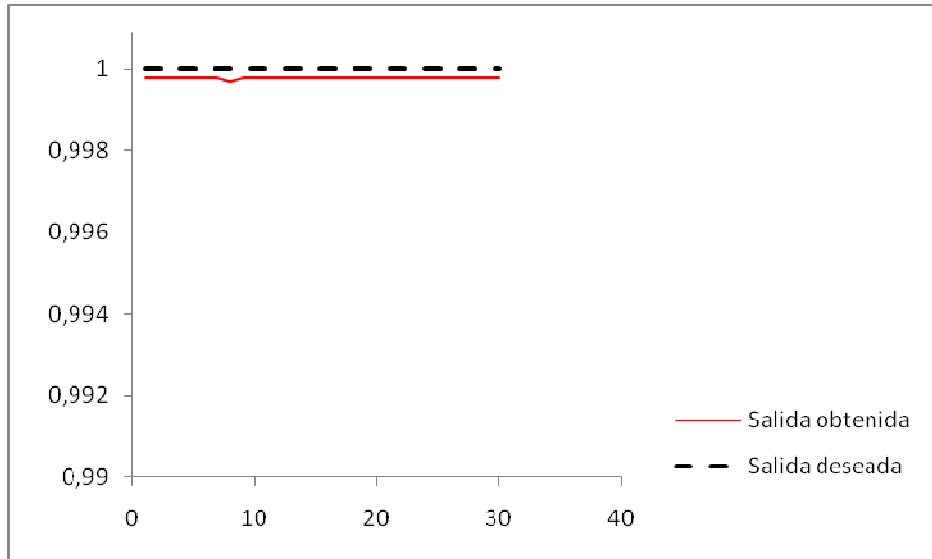
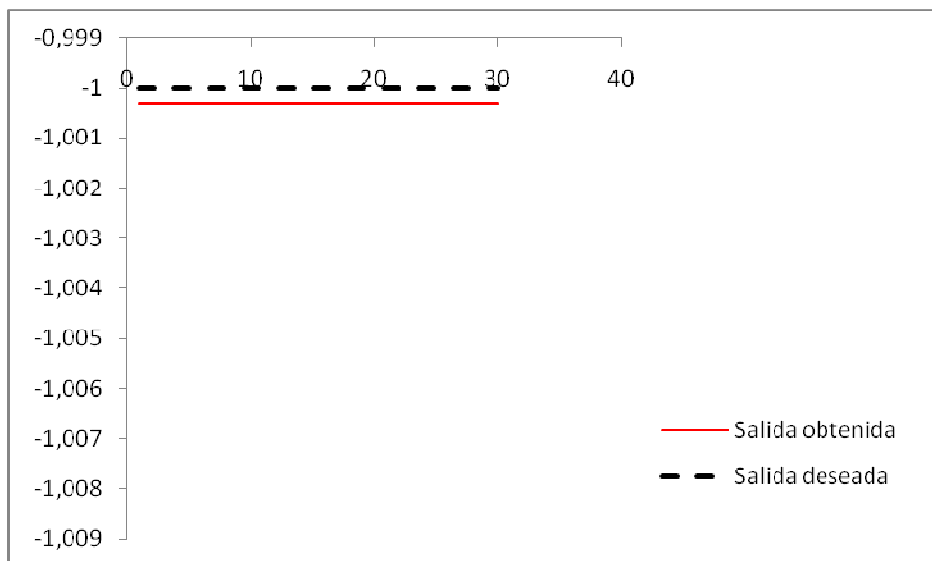


Figura 4.22 Respuesta del caso 4 en operación bajo falla



4.6.5 Caso de prueba 5

Esta prueba se realizó para una resistencia de falla de 5000Ω y con las características ya mencionadas en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4. En las tablas 4.14 y 4.15 se presentan los valores de prueba bajo condiciones de operación y bajo falla, respectivamente.

Tabla 4.14 Respuesta del caso 5 en operación normal

MUESTRA	ENTRADA	SALIDA DESEADA	SALIDA OBTENIDA	ERROR	COMPORTAMIENTO DE LA RED
1	0.0010969	1	1,00000957	9,57E-06	ADECUADO
2	0.0014443	1	1,00001264	1,26E-05	ADECUADO
3	0.0020476	1	1,00002022	2,02E-05	ADECUADO
4	0.0020659	1	1,00002051	2,05E-05	ADECUADO
5	0.0029069	1	1,0000386	3,86E-05	ADECUADO
6	0.0029618	1	1,00004019	4,02E-05	ADECUADO
7	0.0030532	1	1,00004296	4,30E-05	ADECUADO
8	0.003236	1	1,00004904	4,90E-05	ADECUADO
9	0.0033274	1	1,00005237	5,24E-05	ADECUADO
10	0.0033457	1	1,00005305	5,31E-05	ADECUADO
11	0.0035102	1	1,00005961	5,96E-05	ADECUADO
12	0.0035834	1	1,00006274	6,27E-05	ADECUADO
13	0.0036017	1	1,00006354	6,35E-05	ADECUADO
14	0.0036382	1	1,00006518	6,52E-05	ADECUADO
15	0.0039673	1	1,00008153	8,15E-05	ADECUADO
16	0.0040039	1	1,00008353	8,35E-05	ADECUADO
17	0.0041136	1	1,00008976	8,98E-05	ADECUADO
18	0.0042233	1	1,00009632	9,63E-05	ADECUADO
19	0.0042781	1	1,00009972	9,97E-05	ADECUADO
20	0.0043695	1	1,00010557	0,000105565	ADECUADO
21	0.0046438	1	1,00012423	0,000124234	ADECUADO
22	0.0048997	1	1,00014266	0,000142661	ADECUADO
23	0.0054299	1	1,00017773	0,000177727	ADECUADO
24	0.0055213	1	1,00018206	0,000182057	ADECUADO
25	0.0055396	1	1,00018281	0,000182812	ADECUADO
26	0.005759	1	1,00018797	0,000187972	ADECUADO
27	0.0057773	1	1,000188	0,000188	ADECUADO
28	0.0058138	1	1,00018783	0,00018783	ADECUADO
29	0.0059967	1	1,00018149	0,000181494	ADECUADO
30	0.006472	1	1,00009316	9,32E-05	ADECUADO

Tabla 4.15 Respuesta del caso 5 en operación bajo falla

MUESTRA	ENTRADA	SALIDA DESEADA	SALIDA OBTENIDA	ERROR	COMPORTAMIENTO DE LA RED
1	0,01045557	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
2	0,03069936	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
3	0,03602668	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
4	0,01035847	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
5	0,03041419	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
6	0,03569204	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
7	0,01026812	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
8	0,03014886	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
9	0,03538067	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
10	0,01018512	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
11	0,02990513	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
12	0,03509463	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
13	0,0152611	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
14	0,03586613	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
15	0,03483591	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
16	0,01516063	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
17	0,03562984	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
18	0,03460641	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
19	0,01507398	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
20	0,03542597	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
21	0,03440839	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
22	0,0150018	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
23	0,03525614	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
24	0,03424344	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
25	0,01494476	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
26	0,03512189	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
27	0,03411305	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
28	0,01490307	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
29	0,03502377	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO
30	0,03401775	-1	-0,99997324	2,68E-05	ADECUADO

En las figuras 4.23 y 4.24 se observa el comportamiento de la RNA bajo condiciones de operación normal y bajo falla, respectivamente.

Figura 4.23 Respuesta del caso 5 en operación normal

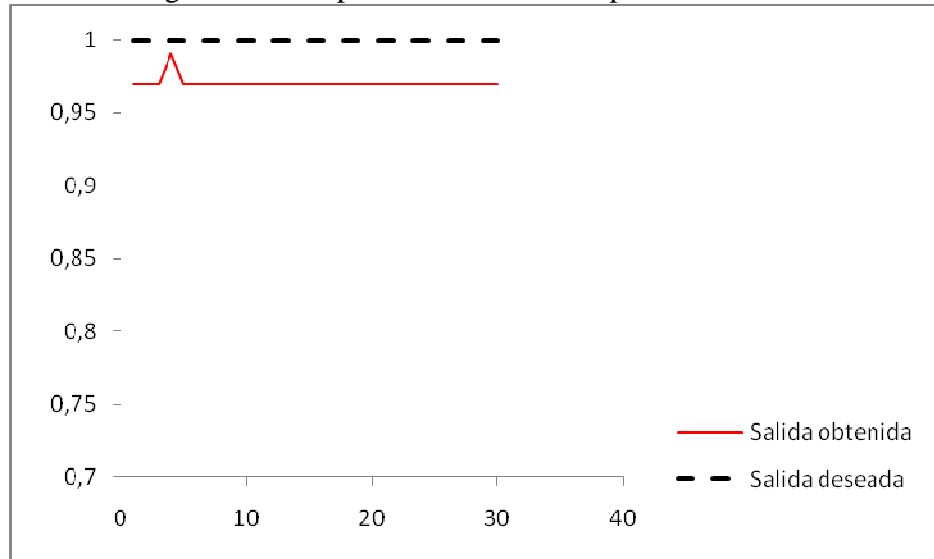
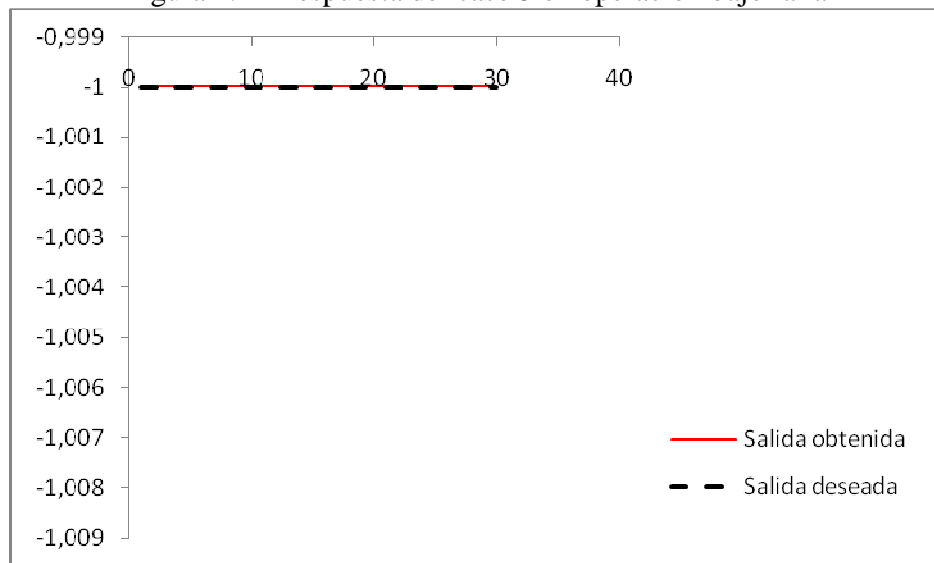


Figura 4.24 Respuesta del caso 5 en operación bajo falla



4.7 COMENTARIOS DE LOS CASOS DE PRUEBA

- Después de haber realizado varias pruebas, se determinó el número de neuronas en la capa oculta por tanteo y error, hasta que se encontró una red que se comportó adecuadamente.

- Para probar el funcionamiento de la red se consideraron cinco casos de prueba bajo condiciones de falla, en los cuales se tuvo en cuenta un valor diferente de resistencia de falla para cada caso. En todos los casos el comportamiento de la red fue adecuado, pues el error entregado por la red al comparar la salida deseada con la real, siempre fue un valor muy pequeño. Estos valores se ilustran a continuación:

Tabla 4.16 Errores máximos de los casos de prueba

CASO DE PRUEBA	MÁXIMO ERROR DE LA RED	
1	Operación normal	1,88E-04
	Bajo falla	1,17E-04
2	Operación normal	1,63E-04
	Bajo falla	6,97E-05
3	Operación normal	8,31E-05
	Bajo falla	6,36E-05
4	Operación normal	2,92E-04
	Bajo falla	3,11E-04
5	Operación normal	1,88E-04
	Bajo falla	2,68E-05

- La arquitectura de la RNA propuesta en este trabajo describe la capacidad que tiene la red neuronal backpropagation de discriminar eficientemente en el generador síncrono, un estado de operación ante uno de falla.
- Después de hacer el análisis del comportamiento de la red neuronal propuesta, se puede concluir que tiene las condiciones adecuadas para actuar como protección diferencial de generadores síncronos, utilizando componentes de terceros armónicos para obtener la corriente diferencial.
- Con la red neuronal se garantiza la protección del 100% para fallas a tierra del devanado del estator del generador síncrono, lo cual es fundamental para el óptimo desempeño del sistema de potencia.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- En este proyecto se presentó una metodología basada en Redes Neuronales Artificiales (RNA) para proteger el devanado del estator de un generador síncrono ante fallas fase-tierra cercanas al punto del neutro. El esquema circuital empleado para implementar la RNA está fundamentado en las componentes del tercer armónico.
- Se empleó una red backpropagation la cual fue entrenada con el algoritmo Levenberg-Marquadt. La RNA que mejor se comportó ante las diversas condiciones operativas de la red fue de una neurona en la capa de entrada, cuatro neuronas en la capa oculta y una neurona en la capa de salida. El error máximo permitido para convergencia y el número máximo de iteraciones fueron de $1 \cdot 10^{-11}$ y 245 ciclos, respectivamente.
- Con el fin de entrenar y posteriormente probar el comportamiento de la RNA se consideraron básicamente dos condiciones operativas del generador: operación normal y operación bajo fallas monofásicas en el devanado del estator. En el conjunto de datos de entrenamiento se emplearon 1350 simulaciones bajo falla (270 por cada caso de prueba) y 270 simulaciones bajo condiciones de operación normal. Bajo condiciones de cortocircuito se consideraron cinco casos diferentes, los cuales tenían en cuenta diversos lugares de ocurrencia de la falla en el estator y diversos valores de la resistencia de la falla. Para probar la red se emplearon 30 casos bajo condiciones de operación normal y 150 casos bajo condiciones de falla (30 por cada caso de prueba). Es preciso aclarar que el conjunto de los datos de prueba no fueron considerados en el conjunto de entrenamiento.
- El comportamiento de la red ante las diversas condiciones de operación fue satisfactorio. Para todos los casos de prueba la red entregó resultados de error por debajo del límite permitido, el cual es de 0,001. Se puede observar además que la red reconoce sin ningún tipo de problema cuando el generador síncrono se encuentra bajo condiciones de operación normal y bajo condiciones de cortocircuito, lo que permite concluir que la metodología se puede adaptar a un sistema real, garantizando el adecuado comportamiento de las protecciones.
- A diferencia de algunas protecciones convencionales, esta metodología presentó un buen comportamiento ante fallas en el devanado del estator cercanas al neutro, pues a pesar de ser uno de los casos más críticos, la red entregó un error menor al máximo permitido, y adicionalmente reconoció la falla, ocasionando de esta forma la operación de las protecciones.

- Las redes neuronales son bastantes eficientes en problemas de clasificación bajo lo cual facilita su implementación para que actúe como relé diferencial, basado esto en una función de reconocimiento de patrones, generados a través del entrenamiento de una red, utilizando como información el componente de tercer armónico de la corriente diferencial.
- Las RNA son una gran alternativa para proteger elementos de un sistema de potencia, pues debido a su gran capacidad de generalización y adaptabilidad a un problema y a los grandes avances en la tecnología actual, se puede garantizar que los tiempos de respuesta ante condiciones no deseadas de operación sean pequeños.

5.2 RECOMENDACIONES

- Con el fin de mejorar la protección del generador síncrono ante diversas condiciones operativas de un sistema real, sería bueno verificar el modelo circuital equivalente basado en las componentes del tercer armónico, para diferentes tipos de falla trifásicas, bifásicas y bifásicas a tierra. Adicionalmente se podría realizar lo anterior empleando un modelo no lineal del generador.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Villada, F., Muñoz, W., Henao, M.A. “Aplicación de las redes neuronales en ingeniería y economía”. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia, 2004.
- [2] Chapman, S.J. “Máquinas Eléctricas”. Ed. McGraw-Hill/Latinoamericana, 2ª Edición, 1993.
- [3] Blackburn, J.L., Thomas, J.D. “Protective Relaying Principles and Applications”. Ed. Marcel Dekker Inc. 3th Edition, 2007.
- [4] Std C37.102-2006 IEEE. “Guide for ac generator protection”.
- [5] Elmore, W.A. “Protective relaying. Theory and application”. ABB Relay Division, Coral Springs. Ed Dekker M. 1994.
- [6] Mozina, C. J. “IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators”, IEEE Tutorial Course, IEEE Power Engineering Society Special Publication, No. 95 TP102, 1995.
- [7] Anderson, P.M. “Power system protection”. IEEE Press Series on Power Engineering, 1998.
- [8] Std C37.2 IEEE “Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms and Contact Designations”.
- [9] Montane, P. “Protecciones en las instalaciones eléctricas”. Ed. Marcombo, 2ª edición. 1993.
- [10] Giraldo, L., Mora, J.J., Olguín, G. “Evaluación de la protección del estator del generador síncrono ante fallas a tierra por medio del método de inyección subarmónica”. Revista ingeniería y Competitividad, Vol. 10, No. 1, 2008.
- [11] Std C62.92-1989 IEEE “Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems - Part I: Introduction”.
- [12] Delgado, A. “Inteligencia artificial y minirobots”. Ed. Ecoe, Santafé de Bogotá, Colombia, 1998.
- [13] Isaza, H., Giraldo, O. “Utilización de redes neuronales artificiales en la reconfiguración de alimentadores primarios”. Tesis de Ingeniería eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira, 1998.
- [14] Hilera, J., Martínez, V. “Redes neuronales artificiales”. Ed. Alfaomega, 2000.

- [15] Alcántara, R., Garcia, F. “100% Stator ground fault protection a comparison of two protection methods” Department of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund Institute of Technology 2005.
- [16] Ruiz, B. “Protección del 100% del estator del generador síncrono ante fallos fase-tierra utilizando el método del tercer armónico”. Tesis de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, 2009.
- [17] <http://www.mathworks.com>

ANEXO

A continuación se ilustran los datos de entrenamiento bajo condiciones de operación normal y bajo falla, para cada uno de los casos de prueba.

Tabla A1 Datos de entrenamiento para el caso 1 en operación normal

Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada
1	0.0011518	1	57	0.00479	1	113	0.0024499	1
2	0.0049911	1	58	0.0047535	1	114	0.003949	1
3	0.0057041	1	59	0.0028704	1	115	0.0043147	1
4	0.0024864	1	60	0.0022305	1	116	0.002651	1
5	0.0044975	1	61	0.0055579	1	117	0.0017917	1
6	0.0054116	1	62	0.004918	1	118	0.0035651	1
7	0.0022122	1	63	0.0023402	1	119	0.0062892	1
8	0.0021025	1	64	0.001554	1	120	0.0019745	1
9	0.0023767	1	65	0.0032726	1	121	0.0027789	1
10	0.0040222	1	66	0.0045889	1	122	0.005631	1
11	0.0044792	1	67	0.0022853	1	123	0.0036748	1
12	0.0047717	1	68	0.0047169	1	124	0.0035285	1
13	0.0025047	1	69	0.0012981	1	125	0.0019014	1
14	0.0019562	1	70	0.0052471	1	126	0.0031263	1
15	0.0043878	1	71	0.0021391	1	127	0.0033091	1
16	0.0017551	1	72	0.0024316	1	128	0.0057956	1
17	0.0041867	1	73	0.0063623	1	129	0.0038028	1
18	0.0063075	1	74	0.006344	1	130	0.0012798	1
19	0.0029435	1	75	0.0011884	1	131	0.0056493	1
20	0.003364	1	76	0.0051557	1	132	0.0036565	1
21	0.0037296	1	77	0.0046803	1	133	0.0030166	1
22	0.0054665	1	78	0.0034737	1	134	0.0049728	1
23	0.0055762	1	79	0.0039125	1	135	0.0030897	1
24	0.0015174	1	80	0.0044427	1	136	0.0030715	1
25	0.0013346	1	81	0.0031812	1	137	0.0056127	1
26	0.0063989	1	82	0.0057407	1	138	0.0027972	1
27	0.0042415	1	83	0.0044244	1	139	0.001682	1
28	0.0045341	1	84	0.0052836	1	140	0.0059235	1
29	0.0012615	1	85	0.0032543	1	141	0.0020111	1
30	0.003492	1	86	0.0012249	1	142	0.0022487	1
31	0.0054482	1	87	0.002395	1	143	0.0047352	1
32	0.0030349	1	88	0.0028886	1	144	0.0015906	1
33	0.0060515	1	89	0.0031446	1	145	0.0064172	1
34	0.004205	1	90	0.0051191	1	146	0.0015723	1

35	0.0014078	1	91	0.0031629	1	147	0.0019379	1
36	0.0064537	1	92	0.0037114	1	148	0.0021756	1
37	0.0025778	1	93	0.0020842	1	149	0.0050825	1
38	0.0052288	1	94	0.0062709	1	150	0.0053933	1
39	0.002523	1	95	0.0012432	1	151	0.003108	1
40	0.0062161	1	96	0.0053202	1	152	0.0021939	1
41	0.0059784	1	97	0.003821	1	153	0.005174	1
42	0.0016454	1	98	0.0048449	1	154	0.0021573	1
43	0.0065269	1	99	0.0040404	1	155	0.0048632	1
44	0.0014992	1	100	0.0064903	1	156	0.0028155	1
45	0.0029983	1	101	0.0037845	1	157	0.0043512	1
46	0.0063806	1	102	0.0041501	1	158	0.0013163	1
47	0.0013529	1	103	0.0026875	1	159	0.0062526	1
48	0.0040587	1	104	0.0018465	1	160	0.0031994	1
49	0.0061246	1	105	0.0036199	1	161	0.0042964	1
50	0.0059601	1	106	0.0058321	1	162	0.0011152	1
51	0.0015357	1	107	0.0046255	1	163	0.0039307	1
52	0.0034188	1	108	0.0061064	1	164	0.0017368	1
53	0.0023219	1	109	0.0028338	1	165	0.0041318	1
54	0.001426	1	110	0.0013712	1	166	0.0045523	1
55	0.0061978	1	111	0.0026327	1	167	0.0055945	1
56	0.0011701	1	112	0.0062343	1	168	0.0024133	1
169	0.0032177	1	205	0.0046072	1	241	0.0046438	1
170	0.0052105	1	206	0.002267	1	242	0.0043695	1
171	0.0034371	1	207	0.005503	1	243	0.0040039	1
172	0.0021208	1	208	0.004333	1	244	0.0048997	1
173	0.0053751	1	209	0.0039856	1	245	0.0042781	1
174	0.0038759	1	210	0.0060149	1	246	0.0014443	1
175	0.0048083	1	211	0.0040953	1	247	0.0042233	1
176	0.0020294	1	212	0.0053385	1	248	0.0030532	1
177	0.0037479	1	213	0.0018283	1	249	0.0033457	1
178	0.0038393	1	214	0.0064354	1	250	0.003236	1
179	0.0017186	1	215	0.0027058	1	251	0.0035102	1
180	0.0034005	1	216	0.0035468	1	252	0.005759	1
181	0.0028521	1	217	0.0051374	1	253	0.0033274	1
182	0.0045158	1	218	0.005046	1	254	0.0055396	1
183	0.00298	1	219	0.0026144	1	255	0.0055213	1
184	0.004077	1	220	0.0038576	1	256	0.0029069	1
185	0.0053019	1	221	0.004662	1	257	0.0029618	1
186	0.0049363	1	222	0.0049546	1	258	0.0039673	1
187	0.0016089	1	223	0.0016637	1	259	0.0058138	1
188	0.0051922	1	224	0.0013895	1	260	0.0020476	1
189	0.0056859	1	225	0.0061429	1	261	0.0010969	1
190	0.0027424	1	226	0.0060332	1	262	0.0057773	1
191	0.0058687	1	227	0.005887	1	263	0.0035834	1
192	0.0046986	1	228	0.0014626	1	264	0.0020659	1

193	0.0034554	1	229	0.0059418	1	265	0.006472	1
194	0.0052654	1	230	0.0032909	1	266	0.0059967	1
195	0.0011335	1	231	0.0016271	1	267	0.0054299	1
196	0.0054848	1	232	0.0061612	1	268	0.0036017	1
197	0.0044061	1	233	0.0019197	1	269	0.0041136	1
198	0.0024681	1	234	0.0048266	1	270	0.0026692	1
199	0.0050094	1	235	0.0065634	1	-----	-----	-----
200	0.0036931	1	236	0.0050277	1	-----	-----	-----
201	0.0058504	1	237	0.0038942	1	-----	-----	-----
202	0.0025596	1	238	0.0014809	1	-----	-----	-----
203	0.0044609	1	239	0.0017003	1	-----	-----	-----
204	0.0041684	1	240	0.0036382	1	-----	-----	-----

Tabla A2. Datos de entrenamiento para el caso 1 en operación bajo falla

Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada
1	0.11262	-1	56	0.084028	-1	111	0.020672	-1
2	0.086741	-1	57	0.021353	-1	112	0.063146	-1
3	0.022042	-1	58	0.065226	-1	113	0.093484	-1
4	0.067331	-1	59	0.096564	-1	114	0.072248	-1
5	0.099681	-1	60	0.074627	-1	115	0.029773	-1
6	0.077036	-1	61	0.030754	-1	116	0.060112	-1
7	0.031746	-1	62	0.062092	-1	117	0.032807	-1
8	0.064096	-1	63	0.033888	-1	118	0.099552	-1
9	0.034981	-1	64	0.10283	-1	119	0.038875	-1
10	0.10615	-1	65	0.040156	-1	120	0.023706	-1
11	0.041451	-1	66	0.024486	-1	121	0.10259	-1
12	0.025276	-1	67	0.10596	-1	122	0.057079	-1
13	0.10939	-1	68	0.058958	-1	123	0.069214	-1
14	0.060861	-1	69	0.071493	-1	124	0.075282	-1
15	0.073801	-1	70	0.077761	-1	125	0.06618	-1
16	0.080271	-1	71	0.06836	-1	126	0.051011	-1
17	0.070566	-1	72	0.052691	-1	127	0.078315	-1
18	0.054391	-1	73	0.080895	-1	128	0.090451	-1
19	0.083506	-1	74	0.09343	-1	129	0.096519	-1
20	0.096446	-1	75	0.099698	-1	130	0.054045	-1
21	0.10292	-1	76	0.055824	-1	131	0.047977	-1
22	0.057626	-1	77	0.049557	-1	132	0.087417	-1
23	0.051156	-1	78	0.090296	-1	133	0.02674	-1
24	0.093211	-1	79	0.02762	-1	134	0.044943	-1
25	0.028511	-1	80	0.046423	-1	135	0.084383	-1
26	0.047921	-1	81	0.087163	-1	136	0.1039	-1
27	0.089976	-1	82	0.10735	-1	137	0.080024	-1
28	0.11086	-1	83	0.082684	-1	138	0.020335	-1
29	0.085381	-1	84	0.021011	-1	139	0.062117	-1
30	0.021697	-1	85	0.064182	-1	140	0.091962	-1
31	0.066276	-1	86	0.095019	-1	141	0.071071	-1
32	0.098119	-1	87	0.073433	-1	142	0.029288	-1
33	0.075829	-1	88	0.030262	-1	143	0.059133	-1
34	0.031249	-1	89	0.061099	-1	144	0.032273	-1
35	0.063092	-1	90	0.033346	-1	145	0.097931	-1
36	0.034434	-1	91	0.10119	-1	146	0.038242	-1
37	0.10449	-1	92	0.039513	-1	147	0.023319	-1
38	0.040802	-1	93	0.024095	-1	148	0.10092	-1
39	0.024881	-1	94	0.10427	-1	149	0.056149	-1
40	0.10767	-1	95	0.058015	-1	150	0.068086	-1
41	0.059907	-1	96	0.07035	-1	151	0.074055	-1
42	0.072644	-1	97	0.076517	-1	152	0.065102	-1
43	0.079013	-1	98	0.067266	-1	153	0.050179	-1
44	0.06946	-1	99	0.051848	-1	154	0.07704	-1

45	0.053539	-1	100	0.0796	-1	155	0.088978	-1
46	0.082197	-1	101	0.091935	-1	156	0.094946	-1
47	0.094934	-1	102	0.098103	-1	157	0.053164	-1
48	0.1013	-1	103	0.054931	-1	158	0.047195	-1
49	0.056723	-1	104	0.048764	-1	159	0.085993	-1
50	0.050355	-1	105	0.088852	-1	160	0.026304	-1
51	0.09175	-1	106	0.027178	-1	161	0.044211	-1
52	0.028065	-1	107	0.04568	-1	162	0.083009	-1
53	0.047171	-1	108	0.085768	-1	163	0.072838	-1
54	0.088566	-1	109	0.10562	-1	164	0.07871	-1
55	0.1091	-1	110	0.08135	-1	165	0.052291	-1
166	0.034678	-1	201	0.09184	-1	236	0.08463	-1
167	0.069903	-1	202	0.031217	-1	237	0.047728	-1
168	0.064032	-1	203	0.065858	-1	238	0.053405	-1
169	0.043484	-1	204	0.057198	-1	239	0.02218	-1
170	0.075774	-1	205	0.083179	-1	240	0.044889	-1
171	0.096322	-1	206	0.02833	-1	241	0.078953	-1
172	0.020001	-1	207	0.097613	-1	242	0.098823	-1
173	0.025872	-1	208	0.016783	-1	243	0.036373	-1
174	0.093386	-1	209	0.086066	-1	244	0.069253	-1
175	0.031743	-1	210	0.048538	-1	245	0.074835	-1
176	0.066968	-1	211	0.054311	-1	246	0.049716	-1
177	0.058162	-1	212	0.022556	-1	247	0.032971	-1
178	0.08458	-1	213	0.045651	-1	248	0.066462	-1
179	0.028807	-1	214	0.080292	-1	249	0.06088	-1
180	0.099257	-1	215	0.1005	-1	250	0.041344	-1
181	0.017066	-1	216	0.03699	-1	251	0.072043	-1
182	0.087516	-1	217	0.070436	-1	252	0.09158	-1
183	0.049355	-1	218	0.076114	-1	253	0.019016	-1
184	0.055226	-1	219	0.050566	-1	254	0.024598	-1
185	0.022936	-1	220	0.033534	-1	255	0.088789	-1
186	0.04642	-1	221	0.067598	-1	256	0.03018	-1
187	0.081645	-1	222	0.061921	-1	257	0.063671	-1
188	0.10219	-1	223	0.04205	-1	258	0.055298	-1
189	0.037613	-1	224	0.073275	-1	259	0.080417	-1
190	0.071632	-1	225	0.093146	-1	260	0.027389	-1
191	0.077406	-1	226	0.019341	-1	261	0.094371	-1
192	0.051424	-1	227	0.025018	-1	262	0.016225	-1
193	0.034104	-1	228	0.090307	-1	263	0.083207	-1
194	0.068745	-1	229	0.030696	-1	264	0.046926	-1
195	0.062972	-1	230	0.064759	-1	265	0.052507	-1
196	0.042764	-1	231	0.056244	-1	266	0.021807	-1
197	0.074519	-1	232	0.081791	-1	267	0.044135	-1
198	0.094726	-1	233	0.027857	-1	268	0.077626	-1
199	0.01967	-1	234	0.095984	-1	269	0.097162	-1
200	0.025443	-1	235	0.016503	-1	270	0.035762	-1

Tabla A3 Datos de entrenamiento para el caso 2 en operación normal

Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada
1	0.0022853	1	57	0.0012432	1	113	0.0016454	1
2	0.0011884	1	58	0.0038576	1	114	0.0056676	1
3	0.0015906	1	59	0.003236	1	115	0.0048632	1
4	0.0030532	1	60	0.0025961	1	116	0.0019745	1
5	0.0053385	1	61	0.0017734	1	117	0.0045341	1
6	0.0037662	1	62	0.0052654	1	118	0.0052105	1
7	0.005759	1	63	0.0065451	1	119	0.0023402	1
8	0.0013895	1	64	0.0061064	1	120	0.0055396	1
9	0.0025778	1	65	0.003821	1	121	0.0012981	1
10	0.0017186	1	66	0.0023036	1	122	0.0039307	1
11	0.0012798	1	67	0.002267	1	123	0.0020476	1
12	0.0020659	1	68	0.0041136	1	124	0.0019379	1
13	0.0011518	1	69	0.0039673	1	125	0.0050643	1
14	0.0024133	1	70	0.0015357	1	126	0.0050825	1
15	0.003108	1	71	0.0039856	1	127	0.0019014	1
16	0.0036748	1	72	0.003364	1	128	0.0062526	1
17	0.0023767	1	73	0.0064172	1	129	0.0046255	1
18	0.0026327	1	74	0.0025596	1	130	0.005174	1
19	0.0038028	1	75	0.0034005	1	131	0.0040404	1
20	0.006472	1	76	0.0056859	1	132	0.0022122	1
21	0.0050094	1	77	0.0018648	1	133	0.0017368	1
22	0.0062343	1	78	0.0057956	1	134	0.0055945	1
23	0.0017551	1	79	0.0028338	1	135	0.0057041	1
24	0.0031994	1	80	0.0041867	1	136	0.0039125	1
25	0.0017917	1	81	0.0053568	1	137	0.0051008	1
26	0.0032177	1	82	0.0044792	1	138	0.004205	1
27	0.005631	1	83	0.0034188	1	139	0.0032726	1
28	0.0031812	1	84	0.0061795	1	140	0.0040039	1
29	0.0035102	1	85	0.0059235	1	141	0.0022487	1
30	0.0046803	1	86	0.0063258	1	142	0.0060149	1
31	0.0045523	1	87	0.0046438	1	143	0.0015723	1
32	0.0064903	1	88	0.0064537	1	144	0.0030166	1
33	0.0011335	1	89	0.0042598	1	145	0.0027972	1
34	0.0021208	1	90	0.0020111	1	146	0.0048814	1
35	0.0012615	1	91	0.0044427	1	147	0.0040587	1
36	0.0054665	1	92	0.001554	1	148	0.0065269	1
37	0.0052288	1	93	0.0014078	1	149	0.003949	1
38	0.0018831	1	94	0.0038393	1	150	0.0054482	1
39	0.0024499	1	95	0.0049546	1	151	0.0060698	1
40	0.0048083	1	96	0.0053933	1	152	0.0029435	1
41	0.0059967	1	97	0.0019928	1	153	0.0041501	1
42	0.0023219	1	98	0.0024681	1	154	0.0042781	1
43	0.0060515	1	99	0.0062709	1	155	0.0051374	1
44	0.0016271	1	100	0.0027789	1	156	0.0052471	1

45	0.0016089	1	101	0.0019197	1	157	0.0051922	1
46	0.0033457	1	102	0.0042964	1	158	0.0025047	1
47	0.0030349	1	103	0.0027424	1	159	0.0033823	1
48	0.002523	1	104	0.0047717	1	160	0.0033274	1
49	0.0059784	1	105	0.0060332	1	161	0.0048449	1
50	0.0021573	1	106	0.0034371	1	162	0.0029069	1
51	0.0016637	1	107	0.0053019	1	163	0.0014809	1
52	0.0044061	1	108	0.0049911	1	164	0.0023584	1
53	0.0021756	1	109	0.0046072	1	165	0.0010969	1
54	0.0045706	1	110	0.0035285	1	166	0.0031629	1
55	0.00181	1	111	0.0020842	1	167	0.0052836	1
56	0.0034554	1	112	0.0036382	1	168	0.0054848	1
169	0.0013163	1	203	0.0063623	1	237	0.0014992	1
170	0.001682	1	204	0.0059053	1	238	0.0027241	1
171	0.006344	1	205	0.0062892	1	239	0.0063989	1
172	0.0038759	1	206	0.0047169	1	240	0.004077	1
173	0.0032909	1	207	0.0014626	1	241	0.0053751	1
174	0.0035468	1	208	0.0040953	1	242	0.0018465	1
175	0.0059601	1	209	0.0048997	1	243	0.0041684	1
176	0.0034737	1	210	0.0021391	1	244	0.0055579	1
177	0.0018283	1	211	0.0026875	1	245	0.0029983	1
178	0.004333	1	212	0.0047535	1	246	0.0063075	1
179	0.0033091	1	213	0.0013529	1	247	0.0030897	1
180	0.002651	1	214	0.0013712	1	248	0.0059418	1
181	0.0011701	1	215	0.0050277	1	249	0.0036931	1
182	0.0029252	1	216	0.0061612	1	250	0.0057773	1
183	0.005503	1	217	0.0037479	1	251	0.0043147	1
184	0.0036199	1	218	0.0038942	1	252	0.0056493	1
185	0.0028155	1	219	0.003492	1	253	0.0063806	1
186	0.005046	1	220	0.0032543	1	254	0.0064354	1
187	0.0057407	1	221	0.0056127	1	255	0.0057224	1
188	0.0012249	1	222	0.0062161	1	256	0.0027607	1
189	0.0025413	1	223	0.0024316	1	257	0.0020294	1
190	0.0031263	1	224	0.0045889	1	258	0.0058687	1
191	0.0012066	1	225	0.0043695	1	259	0.004918	1
192	0.0030715	1	226	0.0024864	1	260	0.0013346	1
193	0.0036017	1	227	0.00479	1	261	0.0061978	1
194	0.0055213	1	228	0.0036565	1	262	0.0061246	1
195	0.0042415	1	229	0.0045158	1	263	0.0065634	1
196	0.0058321	1	230	0.0026144	1	264	0.0041318	1
197	0.0037845	1	231	0.0035834	1	265	0.0054116	1
198	0.0054299	1	232	0.0035651	1	266	0.0053202	1
199	0.0026692	1	233	0.0065086	1	267	0.0014443	1
200	0.0021939	1	234	0.0044975	1	268	0.0051191	1
201	0.0043878	1	235	0.0019562	1	269	0.0011152	1
202	0.0031446	1	236	0.0028521	1	270	0.0047352	1

Tabla A4 Datos de entrenamiento para el caso 2 en operación bajo falla

Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada
1	0.10432	-1	56	0.017902	-1	111	0.050098	-1
2	0.018483	-1	57	0.051773	-1	112	0.03818	-1
3	0.05345	-1	58	0.039457	-1	113	0.044139	-1
4	0.040736	-1	59	0.045614	-1	114	0.10374	-1
5	0.047093	-1	60	0.1072	-1	115	0.062017	-1
6	0.11068	-1	61	0.06409	-1	116	0.0352	-1
7	0.066168	-1	62	0.036378	-1	117	0.059037	-1
8	0.037556	-1	63	0.061011	-1	118	0.094801	-1
9	0.062989	-1	64	0.09797	-1	119	0.023282	-1
10	0.10114	-1	65	0.024059	-1	120	0.079901	-1
11	0.02484	-1	66	0.082571	-1	121	0.085862	-1
12	0.085242	-1	67	0.088727	-1	122	0.029241	-1
13	0.0916	-1	68	0.030219	-1	123	0.020302	-1
14	0.031198	-1	69	0.020981	-1	124	0.053078	-1
15	0.02166	-1	70	0.054852	-1	125	0.064997	-1
16	0.056628	-1	71	0.067169	-1	126	0.070964	-1
17	0.069347	-1	72	0.073328	-1	127	0.056058	-1
18	0.075705	-1	73	0.057931	-1	128	0.04116	-1
19	0.059809	-1	74	0.042535	-1	129	0.032221	-1
20	0.043915	-1	75	0.033297	-1	130	0.026261	-1
21	0.034378	-1	76	0.027139	-1	131	0.076923	-1
22	0.028018	-1	77	0.079492	-1	132	0.082883	-1
23	0.082063	-1	78	0.085652	-1	133	0.073944	-1
24	0.088421	-1	79	0.076404	-1	134	0.047119	-1
25	0.078884	-1	80	0.048694	-1	135	0.067984	-1
26	0.050272	-1	81	0.070248	-1	136	0.063929	-1
27	0.072526	-1	82	0.099409	-1	137	0.090299	-1
28	0.10268	-1	83	0.017612	-1	138	0.072719	-1
29	0.018192	-1	84	0.050934	-1	139	0.040478	-1
30	0.052612	-1	85	0.038817	-1	140	0.081509	-1
31	0.040096	-1	86	0.044875	-1	141	0.10202	-1
32	0.046353	-1	87	0.10547	-1	142	0.017036	-1
33	0.10894	-1	88	0.063051	-1	143	0.025826	-1
34	0.06513	-1	89	0.035788	-1	144	0.022896	-1
35	0.036967	-1	90	0.060022	-1	145	0.046339	-1
36	0.061998	-1	91	0.09638	-1	146	0.099092	-1
37	0.099557	-1	92	0.023671	-1	147	0.078579	-1
38	0.024451	-1	93	0.081234	-1	148	0.031687	-1
39	0.083904	-1	94	0.087293	-1	149	0.066859	-1
40	0.090169	-1	95	0.029729	-1	150	0.055129	-1
41	0.030709	-1	96	0.020641	-1	151	0.058059	-1
42	0.021321	-1	97	0.053964	-1	152	0.087369	-1
43	0.055742	-1	98	0.066081	-1	153	0.028757	-1
44	0.068258	-1	99	0.07214	-1	154	0.052199	-1

45	0.074517	-1	100	0.056992	-1	155	0.043408	-1
46	0.058871	-1	101	0.041847	-1	156	0.019966	-1
47	0.043224	-1	102	0.032759	-1	157	0.06099	-1
48	0.033836	-1	103	0.026699	-1	158	0.093231	-1
49	0.027577	-1	104	0.078206	-1	159	0.049269	-1
50	0.08077	-1	105	0.084262	-1	160	0.037548	-1
51	0.087035	-1	106	0.075177	-1	161	0.07565	-1
52	0.077646	-1	107	0.047905	-1	162	0.034617	-1
53	0.049481	-1	108	0.06911	-1	163	0.06286	-1
54	0.071386	-1	109	0.09778	-1	164	0.088793	-1
55	0.10104	-1	110	0.017323	-1	165	0.071504	-1
166	0.039801	-1	201	0.075965	-1	236	0.041251	-1
167	0.080149	-1	202	0.030633	-1	237	0.018974	-1
168	0.10032	-1	203	0.064633	-1	238	0.057967	-1
169	0.016751	-1	204	0.053295	-1	239	0.0886	-1
170	0.025395	-1	205	0.056136	-1	240	0.04682	-1
171	0.022514	-1	206	0.084463	-1	241	0.035682	-1
172	0.045564	-1	207	0.0278	-1	242	0.071891	-1
173	0.097435	-1	208	0.050462	-1	243	0.032897	-1
174	0.077268	-1	209	0.041964	-1	244	0.059712	-1
175	0.031158	-1	210	0.019302	-1	245	0.084347	-1
176	0.065742	-1	211	0.058969	-1	246	0.067924	-1
177	0.054208	-1	212	0.090129	-1	247	0.037808	-1
178	0.05709	-1	213	0.047629	-1	248	0.076135	-1
179	0.085912	-1	214	0.036298	-1	249	0.095297	-1
180	0.028276	-1	215	0.073132	-1	250	0.015912	-1
181	0.051327	-1	216	0.033465	-1	251	0.024123	-1
182	0.042683	-1	217	0.060752	-1	252	0.021386	-1
183	0.019632	-1	218	0.085815	-1	253	0.043282	-1
184	0.059979	-1	219	0.069106	-1	254	0.092559	-1
185	0.091672	-1	220	0.038466	-1	255	0.073398	-1
186	0.048446	-1	221	0.07746	-1	256	0.029597	-1
187	0.03692	-1	222	0.096955	-1	257	0.062449	-1
188	0.074386	-1	223	0.016189	-1	258	0.051502	-1
189	0.034039	-1	224	0.024543	-1	259	0.054239	-1
190	0.061801	-1	225	0.021758	-1	260	0.08161	-1
191	0.087297	-1	226	0.044036	-1	261	0.02686	-1
192	0.0703	-1	227	0.09417	-1	262	0.048764	-1
193	0.039131	-1	228	0.074676	-1	263	0.040546	-1
194	0.078798	-1	229	0.030112	-1	264	0.018649	-1
195	0.098628	-1	230	0.063537	-1	265	0.056976	-1
196	0.016469	-1	231	0.052398	-1	266	0.087085	-1
197	0.024967	-1	232	0.055182	-1	267	0.046019	-1
198	0.022134	-1	233	0.08303	-1	268	0.035071	-1
199	0.044797	-1	234	0.027328	-1	269	0.070661	-1
200	0.095795	-1	235	0.049605	-1	270	0.032334	-1

Tabla A5 Datos de entrenamiento para el caso 3 en operación normal

Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada
1	0.0037845	1	57	0.0062526	1	113	0.0050643	1
2	0.0052105	1	58	0.0034005	1	114	0.0022122	1
3	0.0013529	1	59	0.0051008	1	115	0.0016637	1
4	0.003108	1	60	0.0021208	1	116	0.0036017	1
5	0.0042415	1	61	0.0043147	1	117	0.003236	1
6	0.0060881	1	62	0.0015357	1	118	0.0040039	1
7	0.0042598	1	63	0.0033091	1	119	0.0018283	1
8	0.0025778	1	64	0.0051191	1	120	0.0041684	1
9	0.0057956	1	65	0.0046803	1	121	0.0043512	1
10	0.005631	1	66	0.0014809	1	122	0.0040222	1
11	0.0046255	1	67	0.0021025	1	123	0.0028704	1
12	0.0060698	1	68	0.0058138	1	124	0.0030715	1
13	0.0056676	1	69	0.0049911	1	125	0.0051922	1
14	0.0020294	1	70	0.0012249	1	126	0.0061246	1
15	0.0060515	1	71	0.0047535	1	127	0.0024681	1
16	0.004662	1	72	0.0016454	1	128	0.0058687	1
17	0.0036931	1	73	0.0031446	1	129	0.0028521	1
18	0.004205	1	74	0.0034554	1	130	0.0042964	1
19	0.0014992	1	75	0.0047169	1	131	0.0046438	1
20	0.0064172	1	76	0.0062343	1	132	0.003821	1
21	0.0046072	1	77	0.005503	1	133	0.0042781	1
22	0.0055579	1	78	0.0019745	1	134	0.0063989	1
23	0.005174	1	79	0.002395	1	135	0.0030532	1
24	0.0029983	1	80	0.0048814	1	136	0.0045341	1
25	0.0026692	1	81	0.0065269	1	137	0.0023584	1
26	0.0058321	1	82	0.0036565	1	138	0.0037479	1
27	0.0014078	1	83	0.0052654	1	139	0.0046986	1
28	0.0027241	1	84	0.0029069	1	140	0.0055945	1
29	0.0059601	1	85	0.00181	1	141	0.0029435	1
30	0.0044244	1	86	0.0020659	1	142	0.0045706	1
31	0.0054482	1	87	0.0023036	1	143	0.0018648	1
32	0.0028338	1	88	0.0035285	1	144	0.0033823	1
33	0.0065086	1	89	0.005887	1	145	0.0029252	1
34	0.002523	1	90	0.0027607	1	146	0.0063806	1
35	0.0053202	1	91	0.0050094	1	147	0.0018465	1
36	0.0015906	1	92	0.0029618	1	148	0.0053568	1
37	0.002651	1	93	0.0019014	1	149	0.0013346	1
38	0.0064354	1	94	0.0019928	1	150	0.0037296	1
39	0.0045889	1	95	0.0052836	1	151	0.0059053	1
40	0.0048266	1	96	0.0013895	1	152	0.0024864	1
41	0.0044975	1	97	0.0016271	1	153	0.005759	1
42	0.00479	1	98	0.0011884	1	154	0.003949	1
43	0.0012798	1	99	0.003492	1	155	0.005046	1
44	0.0019562	1	100	0.0040587	1	156	0.001554	1

45	0.0064537	1	101	0.0035468	1	157	0.0049546	1
46	0.0055213	1	102	0.0017551	1	158	0.0017734	1
47	0.0015723	1	103	0.0041867	1	159	0.0020842	1
48	0.0062709	1	104	0.0045158	1	160	0.0044427	1
49	0.0052471	1	105	0.0010969	1	161	0.0049363	1
50	0.0056859	1	106	0.0063075	1	162	0.0056127	1
51	0.0039125	1	107	0.0059967	1	163	0.001426	1
52	0.0031263	1	108	0.001682	1	164	0.0035651	1
53	0.0048997	1	109	0.0017917	1	165	0.0012066	1
54	0.0047717	1	110	0.0060149	1	166	0.0033274	1
55	0.0054299	1	111	0.0065451	1	167	0.0053933	1
56	0.0053385	1	112	0.0043695	1	168	0.0021391	1
169	0.0036382	1	203	0.0032177	1	237	0.0035102	1
170	0.0031629	1	204	0.0031994	1	238	0.0049728	1
171	0.0053751	1	205	0.0038759	1	239	0.0057773	1
172	0.004918	1	206	0.0061612	1	240	0.0040404	1
173	0.0037114	1	207	0.004333	1	241	0.0060332	1
174	0.0027424	1	208	0.0028886	1	242	0.0017003	1
175	0.0032726	1	209	0.0024133	1	243	0.0062161	1
176	0.0039673	1	210	0.0019197	1	244	0.0025596	1
177	0.0031812	1	211	0.0059235	1	245	0.0023219	1
178	0.0052288	1	212	0.0033457	1	246	0.006344	1
179	0.0059784	1	213	0.0014443	1	247	0.0041501	1
180	0.0055762	1	214	0.0048449	1	248	0.0050277	1
181	0.0020111	1	215	0.0038028	1	249	0.0037662	1
182	0.0057224	1	216	0.0022305	1	250	0.0042233	1
183	0.0024316	1	217	0.0016089	1	251	0.0063623	1
184	0.0034371	1	218	0.0050825	1	252	0.0061429	1
185	0.0027789	1	219	0.0034737	1	253	0.0018831	1
186	0.0063258	1	220	0.0012981	1	254	0.0036748	1
187	0.0044792	1	221	0.0058504	1	255	0.0038393	1
188	0.0013163	1	222	0.0022853	1	256	0.0055396	1
189	0.0041136	1	223	0.0045523	1	257	0.0011152	1
190	0.0030897	1	224	0.0030349	1	258	0.0023767	1
191	0.0048632	1	225	0.0026327	1	259	0.0025047	1
192	0.0057041	1	226	0.0011518	1	260	0.0015174	1
193	0.0011701	1	227	0.0051374	1	261	0.0012432	1
194	0.0059418	1	228	0.0036199	1	262	0.0043878	1
195	0.0023402	1	229	0.0013712	1	263	0.00298	1
196	0.003364	1	230	0.0061064	1	264	0.0011335	1
197	0.0017186	1	231	0.0047352	1	265	0.0020476	1
198	0.0032543	1	232	0.0040953	1	266	0.0019379	1
199	0.0048083	1	233	0.0039307	1	267	0.0065634	1
200	0.0056493	1	234	0.0039856	1	268	0.0017368	1
201	0.004077	1	235	0.0057407	1	269	0.0051557	1
202	0.0014626	1	236	0.0027058	1	270	0.0021756	1

Tabla A6 Datos de entrenamiento para el caso 3 en operación bajo falla

Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada
1	0.063709	-1	56	0.031061	-1	111	0.048634	-1
2	0.048901	-1	57	0.021365	-1	112	0.022932	-1
3	0.056305	-1	58	0.028637	-1	113	0.069664	-1
4	0.043965	-1	59	0.050453	-1	114	0.050971	-1
5	0.039029	-1	60	0.057725	-1	115	0.025269	-1
6	0.041497	-1	61	0.084389	-1	116	0.039288	-1
7	0.024221	-1	62	0.072269	-1	117	0.046298	-1
8	0.014349	-1	63	0.064997	-1	118	0.057981	-1
9	0.076049	-1	64	0.044781	-1	119	0.079011	-1
10	0.078517	-1	65	0.037641	-1	120	0.067328	-1
11	0.071113	-1	66	0.018599	-1	121	0.027605	-1
12	0.036561	-1	67	0.020979	-1	122	0.064991	-1
13	0.080985	-1	68	0.03288	-1	123	0.074338	-1
14	0.016817	-1	69	0.073343	-1	124	0.055644	-1
15	0.053837	-1	70	0.013838	-1	125	0.041625	-1
16	0.034093	-1	71	0.063822	-1	126	0.060318	-1
17	0.083453	-1	72	0.03526	-1	127	0.043146	-1
18	0.046433	-1	73	0.0305	-1	128	0.036266	-1
19	0.068645	-1	74	0.082864	-1	129	0.01792	-1
20	0.031625	-1	75	0.049541	-1	130	0.020213	-1
21	0.021753	-1	76	0.023359	-1	131	0.031679	-1
22	0.029157	-1	77	0.070963	-1	132	0.070666	-1
23	0.051369	-1	78	0.051921	-1	133	0.013333	-1
24	0.058772	-1	79	0.02574	-1	134	0.061492	-1
25	0.085921	-1	80	0.040021	-1	135	0.033973	-1
26	0.073581	-1	81	0.047161	-1	136	0.029386	-1
27	0.066177	-1	82	0.059062	-1	137	0.079839	-1
28	0.062573	-1	83	0.080484	-1	138	0.047733	-1
29	0.048029	-1	84	0.068583	-1	139	0.022507	-1
30	0.055301	-1	85	0.02812	-1	140	0.068373	-1
31	0.043181	-1	86	0.066202	-1	141	0.050026	-1
32	0.038333	-1	87	0.075724	-1	142	0.0248	-1
33	0.040757	-1	88	0.056682	-1	143	0.03856	-1
34	0.023789	-1	89	0.042401	-1	144	0.04544	-1
35	0.014093	-1	90	0.061442	-1	145	0.056906	-1
36	0.074693	-1	91	0.043961	-1	146	0.077546	-1
37	0.077117	-1	92	0.036951	-1	147	0.066079	-1
38	0.069845	-1	93	0.018258	-1	148	0.027093	-1
39	0.035909	-1	94	0.020595	-1	149	0.063786	-1
40	0.079541	-1	95	0.032278	-1	150	0.072959	-1
41	0.016517	-1	96	0.072001	-1	151	0.054612	-1
42	0.052877	-1	97	0.013585	-1	152	0.040853	-1
43	0.033485	-1	98	0.062654	-1	153	0.059199	-1
44	0.081965	-1	99	0.034615	-1	154	0.042336	-1

45	0.045605	-1	100	0.029942	-1	155	0.035585	-1
46	0.067421	-1	101	0.081347	-1	156	0.017583	-1
47	0.019834	-1	102	0.063606	-1	157	0.063292	-1
48	0.031085	-1	103	0.026079	-1	158	0.02508	-1
49	0.069339	-1	104	0.061399	-1	159	0.071784	-1
50	0.013083	-1	105	0.070229	-1	160	0.067538	-1
51	0.060338	-1	106	0.052569	-1	161	0.022957	-1
52	0.033335	-1	107	0.039324	-1	162	0.069661	-1
53	0.028835	-1	108	0.056984	-1	163	0.033572	-1
54	0.07834	-1	109	0.047228	-1	164	0.031449	-1
55	0.046837	-1	110	0.066713	-1	165	0.016588	-1
166	0.022084	-1	201	0.027743	-1	236	0.061169	-1
167	0.067089	-1	202	0.075373	-1	237	0.014465	-1
168	0.049087	-1	203	0.036403	-1	238	0.048432	-1
169	0.024334	-1	204	0.029908	-1	239	0.056923	-1
170	0.037835	-1	205	0.038568	-1	240	0.044186	-1
171	0.044586	-1	206	0.042898	-1	241	0.020834	-1
172	0.055837	-1	207	0.060218	-1	242	0.03994	-1
173	0.076089	-1	208	0.012587	-1	243	0.018711	-1
174	0.064839	-1	209	0.064548	-1	244	0.045399	-1
175	0.026584	-1	210	0.025577	-1	245	0.06413	-1
176	0.062588	-1	211	0.073208	-1	246	0.026668	-1
177	0.071589	-1	212	0.068878	-1	247	0.072455	-1
178	0.053587	-1	213	0.023412	-1	248	0.034993	-1
179	0.040086	-1	214	0.071043	-1	249	0.028749	-1
180	0.058088	-1	215	0.034238	-1	250	0.037075	-1
181	0.041532	-1	216	0.032073	-1	251	0.041237	-1
182	0.034909	-1	217	0.016917	-1	252	0.057886	-1
183	0.017249	-1	218	0.062382	-1	253	0.0121	-1
184	0.019456	-1	219	0.014752	-1	254	0.062049	-1
185	0.030494	-1	220	0.049393	-1	255	0.024587	-1
186	0.068021	-1	221	0.058053	-1	256	0.070373	-1
187	0.012834	-1	222	0.045063	-1	257	0.066211	-1
188	0.059191	-1	223	0.021247	-1	258	0.022506	-1
189	0.032701	-1	224	0.040733	-1	259	0.068292	-1
190	0.028286	-1	225	0.019082	-1	260	0.032912	-1
191	0.076851	-1	226	0.046309	-1	261	0.030831	-1
192	0.045947	-1	227	0.065415	-1	262	0.016262	-1
193	0.021664	-1	228	0.027203	-1	263	0.059967	-1
194	0.065814	-1	229	0.073906	-1	264	0.014181	-1
195	0.048154	-1	230	0.035694	-1	265	0.04748	-1
196	0.023872	-1	231	0.029326	-1	266	0.055805	-1
197	0.037116	-1	232	0.037818	-1	267	0.043318	-1
198	0.043739	-1	233	0.042063	-1	268	0.020425	-1
199	0.054776	-1	234	0.059046	-1	269	0.039156	-1
200	0.074644	-1	235	0.012342	-1	270	0.018343	-1

Tabla A7 Datos de entrenamiento para el caso 4 en operación normal

Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada
1	0.0031446	1	57	0.0017734	1	113	0.0011335	1
2	0.0020842	1	58	0.003236	1	114	0.0026875	1
3	0.0036382	1	59	0.0047352	1	115	0.0060881	1
4	0.0017368	1	60	0.0048814	1	116	0.0014992	1
5	0.0034188	1	61	0.0038942	1	117	0.0064903	1
6	0.0054665	1	62	0.0052654	1	118	0.0064537	1
7	0.005174	1	63	0.0051374	1	119	0.004918	1
8	0.0033274	1	64	0.0051191	1	120	0.0017917	1
9	0.002651	1	65	0.003821	1	121	0.0025961	1
10	0.0061429	1	66	0.0037662	1	122	0.0011152	1
11	0.0058321	1	67	0.0064354	1	123	0.0056127	1
12	0.0041684	1	68	0.0058504	1	124	0.005887	1
13	0.003949	1	69	0.0053385	1	125	0.0040039	1
14	0.0029252	1	70	0.0038759	1	126	0.005759	1
15	0.0041501	1	71	0.001682	1	127	0.002267	1
16	0.0050094	1	72	0.0034554	1	128	0.0037114	1
17	0.0054116	1	73	0.0012249	1	129	0.0031812	1
18	0.0061612	1	74	0.006472	1	130	0.0017003	1
19	0.0065086	1	75	0.0059784	1	131	0.0032177	1
20	0.0037845	1	76	0.0027607	1	132	0.0054482	1
21	0.0042415	1	77	0.0030897	1	133	0.0035468	1
22	0.0031994	1	78	0.0037479	1	134	0.0041318	1
23	0.0053751	1	79	0.003364	1	135	0.0043878	1
24	0.0053202	1	80	0.0023402	1	136	0.0021939	1
25	0.0012981	1	81	0.0019745	1	137	0.0062161	1
26	0.0021025	1	82	0.0036017	1	138	0.0045889	1
27	0.0060332	1	83	0.0051922	1	139	0.002523	1
28	0.0063989	1	84	0.0056493	1	140	0.0028338	1
29	0.0040953	1	85	0.0053568	1	141	0.0028521	1
30	0.0014809	1	86	0.0051557	1	142	0.0018283	1
31	0.0035651	1	87	0.002395	1	143	0.0042781	1
32	0.0014626	1	88	0.0024133	1	144	0.0033457	1
33	0.0018465	1	89	0.0057407	1	145	0.0029618	1
34	0.0022853	1	90	0.0055579	1	146	0.0023219	1
35	0.0019014	1	91	0.0029983	1	147	0.005503	1
36	0.0021391	1	92	0.0036565	1	148	0.0043512	1
37	0.0059601	1	93	0.0029435	1	149	0.0013346	1
38	0.0057041	1	94	0.0017551	1	150	0.0060698	1
39	0.0011518	1	95	0.0045158	1	151	0.0064172	1
40	0.0012615	1	96	0.004205	1	152	0.0012066	1
41	0.0048632	1	97	0.0044061	1	153	0.0011884	1
42	0.0026327	1	98	0.0047535	1	154	0.0045523	1
43	0.0016089	1	99	0.0023036	1	155	0.0041136	1
44	0.0030166	1	100	0.0032543	1	156	0.0027972	1

45	0.0038028	1	101	0.0051008	1	157	0.0063623	1
46	0.0065451	1	102	0.0049911	1	158	0.0061795	1
47	0.0056676	1	103	0.0040222	1	159	0.0016271	1
48	0.0014078	1	104	0.0023767	1	160	0.0060515	1
49	0.0048266	1	105	0.0031629	1	161	0.0044427	1
50	0.0046986	1	106	0.005046	1	162	0.0019928	1
51	0.0023584	1	107	0.0019379	1	163	0.0021573	1
52	0.0024681	1	108	0.0013163	1	164	0.0015723	1
53	0.0018831	1	109	0.0059418	1	165	0.0050277	1
54	0.0048997	1	110	0.00479	1	166	0.0033091	1
55	0.0025778	1	111	0.0059967	1	167	0.0040587	1
56	0.0061978	1	112	0.0058687	1	168	0.0015906	1
169	0.0058138	1	203	0.0055945	1	237	0.0062709	1
170	0.0049363	1	204	0.0059235	1	238	0.0044975	1
171	0.0016637	1	205	0.0046803	1	239	0.0030349	1
172	0.0020294	1	206	0.0048083	1	240	0.0019197	1
173	0.0046438	1	207	0.0057224	1	241	0.0026692	1
174	0.0035834	1	208	0.0022305	1	242	0.0036199	1
175	0.0042964	1	209	0.0012798	1	243	0.0045706	1
176	0.0040404	1	210	0.0044609	1	244	0.0047717	1
177	0.0041867	1	211	0.0065269	1	245	0.0016454	1
178	0.0060149	1	212	0.0011701	1	246	0.0024864	1
179	0.0022122	1	213	0.0028155	1	247	0.0013529	1
180	0.0025413	1	214	0.0048449	1	248	0.005631	1
181	0.0059053	1	215	0.0044244	1	249	0.0028886	1
182	0.0042598	1	216	0.0032726	1	250	0.004662	1
183	0.0054848	1	217	0.0050643	1	251	0.0025047	1
184	0.0052471	1	218	0.0021756	1	252	0.006344	1
185	0.0015357	1	219	0.0027241	1	253	0.0062526	1
186	0.0046072	1	220	0.003108	1	254	0.0013895	1
187	0.00298	1	221	0.0054299	1	255	0.0028704	1
188	0.0017186	1	222	0.0055396	1	256	0.0014443	1
189	0.0027424	1	223	0.0046255	1	257	0.001426	1
190	0.00181	1	224	0.0052288	1	258	0.0063075	1
191	0.0043695	1	225	0.0012432	1	259	0.0052105	1
192	0.004333	1	226	0.0025596	1	260	0.0026144	1
193	0.0013712	1	227	0.0039307	1	261	0.0035285	1
194	0.0044792	1	228	0.0030532	1	262	0.0065634	1
195	0.0047169	1	229	0.0043147	1	263	0.0049546	1
196	0.0039856	1	230	0.0057956	1	264	0.003492	1
197	0.0055762	1	231	0.0018648	1	265	0.0055213	1
198	0.0063806	1	232	0.0038576	1	266	0.0053933	1
199	0.0049728	1	233	0.001554	1	267	0.0034371	1
200	0.0022487	1	234	0.0015174	1	268	0.0010969	1
201	0.0039673	1	235	0.0061064	1	269	0.0037296	1
202	0.0024316	1	236	0.0027058	1	270	0.0063258	1

Tabla A8 Datos de entrenamiento para el caso 4 en operación bajo falla

Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada
1	0.025337	-1	56	0.0088108	-1	111	0.009685	-1
2	0.0091761	-1	57	0.010104	-1	112	0.013403	-1
3	0.010523	-1	58	0.013983	-1	113	0.020841	-1
4	0.014563	-1	59	0.021742	-1	114	0.0072061	-1
5	0.022644	-1	60	0.0075177	-1	115	0.039435	-1
6	0.0078294	-1	61	0.04114	-1	116	0.018362	-1
7	0.042846	-1	62	0.019156	-1	117	0.038195	-1
8	0.01995	-1	63	0.039847	-1	118	0.043154	-1
9	0.041499	-1	64	0.04502	-1	119	0.040675	-1
10	0.046886	-1	65	0.042434	-1	120	0.02456	-1
11	0.044193	-1	66	0.025622	-1	121	0.019602	-1
12	0.026684	-1	67	0.020449	-1	122	0.035716	-1
13	0.021297	-1	68	0.037261	-1	123	0.029518	-1
14	0.038806	-1	69	0.030795	-1	124	0.025799	-1
15	0.032072	-1	70	0.026915	-1	125	0.036956	-1
16	0.028031	-1	71	0.038554	-1	126	0.010924	-1
17	0.040152	-1	72	0.011397	-1	127	0.033237	-1
18	0.011869	-1	73	0.034674	-1	128	0.022081	-1
19	0.036112	-1	74	0.023036	-1	129	0.017122	-1
20	0.02399	-1	75	0.017863	-1	130	0.034477	-1
21	0.018603	-1	76	0.035967	-1	131	0.031997	-1
22	0.037459	-1	77	0.033381	-1	132	0.027039	-1
23	0.034765	-1	78	0.028208	-1	133	0.028279	-1
24	0.029378	-1	79	0.029502	-1	134	0.030758	-1
25	0.030725	-1	80	0.032088	-1	135	0.014643	-1
26	0.033418	-1	81	0.015276	-1	136	0.022816	-1
27	0.01591	-1	82	0.023824	-1	137	0.008263	-1
28	0.024833	-1	83	0.0086282	-1	138	0.0094756	-1
29	0.0089934	-1	84	0.0098944	-1	139	0.013114	-1
30	0.010313	-1	85	0.013693	-1	140	0.02039	-1
31	0.014273	-1	86	0.021292	-1	141	0.0070503	-1
32	0.022193	-1	87	0.0073619	-1	142	0.038582	-1
33	0.0076735	-1	88	0.040288	-1	143	0.017965	-1
34	0.041993	-1	89	0.018759	-1	144	0.037369	-1
35	0.019553	-1	90	0.039021	-1	145	0.04222	-1
36	0.040673	-1	91	0.044087	-1	146	0.039795	-1
37	0.045953	-1	92	0.041554	-1	147	0.024029	-1
38	0.043313	-1	93	0.025091	-1	148	0.019178	-1
39	0.026153	-1	94	0.020025	-1	149	0.034944	-1
40	0.020873	-1	95	0.036488	-1	150	0.02888	-1
41	0.038033	-1	96	0.030156	-1	151	0.025242	-1
42	0.031433	-1	97	0.026357	-1	152	0.036157	-1
43	0.027473	-1	98	0.037755	-1	153	0.010688	-1
44	0.039353	-1	99	0.011161	-1	154	0.032518	-1

45	0.011633	-1	100	0.033956	-1	155	0.021603	-1
46	0.035393	-1	101	0.022558	-1	156	0.016752	-1
47	0.023513	-1	102	0.017493	-1	157	0.033731	-1
48	0.018233	-1	103	0.035222	-1	158	0.031306	-1
49	0.036713	-1	104	0.032689	-1	159	0.026454	-1
50	0.034073	-1	105	0.027624	-1	160	0.027667	-1
51	0.028793	-1	106	0.02889	-1	161	0.030093	-1
52	0.030113	-1	107	0.031423	-1	162	0.014326	-1
53	0.032753	-1	108	0.01496	-1	163	0.022312	-1
54	0.015593	-1	109	0.02332	-1	164	0.0080803	-1
55	0.024329	-1	110	0.0084455	-1	165	0.0092662	-1
166	0.012824	-1	201	0.022967	-1	236	0.020171	-1
167	0.01994	-1	202	0.01833	-1	237	0.015642	-1
168	0.0068945	-1	203	0.0334	-1	238	0.031495	-1
169	0.03773	-1	204	0.027604	-1	239	0.02923	-1
170	0.017568	-1	205	0.024126	-1	240	0.024701	-1
171	0.036544	-1	206	0.034559	-1	241	0.025833	-1
172	0.041287	-1	207	0.010216	-1	242	0.028098	-1
173	0.038916	-1	208	0.031081	-1	243	0.013377	-1
174	0.023498	-1	209	0.020649	-1	244	0.0208	-1
175	0.018754	-1	210	0.016012	-1	245	0.0075328	-1
176	0.034172	-1	211	0.032241	-1	246	0.0086383	-1
177	0.028242	-1	212	0.029922	-1	247	0.011955	-1
178	0.024684	-1	213	0.025285	-1	248	0.018589	-1
179	0.035358	-1	214	0.026445	-1	249	0.0064273	-1
180	0.010452	-1	215	0.028763	-1	250	0.035172	-1
181	0.0318	-1	216	0.013693	-1	251	0.016377	-1
182	0.021126	-1	217	0.021304	-1	252	0.034067	-1
183	0.016382	-1	218	0.0077153	-1	253	0.038489	-1
184	0.032986	-1	219	0.0088476	-1	254	0.036278	-1
185	0.030614	-1	220	0.012244	-1	255	0.021906	-1
186	0.02587	-1	221	0.019039	-1	256	0.017483	-1
187	0.027056	-1	222	0.006583	-1	257	0.031856	-1
188	0.029428	-1	223	0.036025	-1	258	0.026328	-1
189	0.01401	-1	224	0.016774	-1	259	0.023011	-1
190	0.021808	-1	225	0.034892	-1	260	0.032961	-1
191	0.0078978	-1	226	0.039422	-1	261	0.0097438	-1
192	0.0090569	-1	227	0.037157	-1	262	0.029645	-1
193	0.012534	-1	228	0.022436	-1	263	0.019694	-1
194	0.019489	-1	229	0.017907	-1	264	0.015272	-1
195	0.0067387	-1	230	0.032627	-1	265	0.03075	-1
196	0.036877	-1	231	0.026966	-1	266	0.028539	-1
197	0.017171	-1	232	0.023569	-1	267	0.024117	-1
198	0.035718	-1	233	0.03376	-1	268	0.025222	-1
199	0.040355	-1	234	0.0099799	-1	269	0.027433	-1
200	0.038036	-1	235	0.030363	-1	270	0.01306	-1

Tabla A9 Datos de entrenamiento para el caso 5 en operación normal

Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada
1	0.0054848	1	57	0.0040404	1	113	0.0049728	1
2	0.0059967	1	58	0.0045889	1	114	0.0020294	1
3	0.0013712	1	59	0.0052836	1	115	0.0028155	1
4	0.0017917	1	60	0.0010969	1	116	0.0058504	1
5	0.0042233	1	61	0.0032726	1	117	0.0016637	1
6	0.0036748	1	62	0.001682	1	118	0.0040953	1
7	0.0036199	1	63	0.0049363	1	119	0.0051008	1
8	0.0044061	1	64	0.0039673	1	120	0.0038028	1
9	0.0041136	1	65	0.0057041	1	121	0.0014809	1
10	0.0055396	1	66	0.0041501	1	122	0.0032177	1
11	0.0025961	1	67	0.0046438	1	123	0.0030715	1
12	0.0028521	1	68	0.0061429	1	124	0.0011518	1
13	0.001554	1	69	0.0017551	1	125	0.0062343	1
14	0.0056127	1	70	0.0039125	1	126	0.0055579	1
15	0.0055762	1	71	0.0027241	1	127	0.0044975	1
16	0.0032909	1	72	0.0024133	1	128	0.0024316	1
17	0.0013895	1	73	0.004662	1	129	0.0017368	1
18	0.0038942	1	74	0.0011701	1	130	0.0060881	1
19	0.0012981	1	75	0.0052471	1	131	0.0037114	1
20	0.0042415	1	76	0.0017734	1	132	0.0031446	1
21	0.0051557	1	77	0.0060515	1	133	0.0048814	1
22	0.0015723	1	78	0.0061795	1	134	0.0026692	1
23	0.0044427	1	79	0.0046255	1	135	0.0047717	1
24	0.002523	1	80	0.0031629	1	136	0.0024681	1
25	0.0065086	1	81	0.0046986	1	137	0.0021756	1
26	0.0049911	1	82	0.001426	1	138	0.0035285	1
27	0.0064172	1	83	0.0019379	1	139	0.0044244	1
28	0.0025413	1	84	0.0015174	1	140	0.0055945	1
29	0.0026144	1	85	0.003108	1	141	0.0051374	1
30	0.005174	1	86	0.0047169	1	142	0.0052288	1
31	0.0062161	1	87	0.0025596	1	143	0.0036382	1
32	0.006344	1	88	0.0057773	1	144	0.0023402	1
33	0.0048449	1	89	0.0045523	1	145	0.005503	1
34	0.0011152	1	90	0.0037662	1	146	0.0018831	1
35	0.0038393	1	91	0.0013163	1	147	0.0060149	1
36	0.0052654	1	92	0.0029983	1	148	0.0051922	1
37	0.0043512	1	93	0.0028886	1	149	0.0021025	1
38	0.0027789	1	94	0.0063623	1	150	0.0056676	1
39	0.0045706	1	95	0.0048083	1	151	0.0043695	1
40	0.0027972	1	96	0.0018465	1	152	0.003236	1
41	0.0030166	1	97	0.0056859	1	153	0.0035468	1
42	0.0063258	1	98	0.0044792	1	154	0.0017003	1
43	0.0030349	1	99	0.002651	1	155	0.0063075	1
44	0.0057407	1	100	0.0022305	1	156	0.0034005	1

45	0.0041867	1	101	0.0030532	1	157	0.0047535	1
46	0.005631	1	102	0.0053933	1	158	0.0033457	1
47	0.0012432	1	103	0.0021391	1	159	0.0054116	1
48	0.004205	1	104	0.0051191	1	160	0.005887	1
49	0.0013346	1	105	0.0036017	1	161	0.004077	1
50	0.0027058	1	106	0.002267	1	162	0.0015906	1
51	0.0019197	1	107	0.0053385	1	163	0.0064354	1
52	0.0022853	1	108	0.0059418	1	164	0.0023219	1
53	0.0022487	1	109	0.0055213	1	165	0.0012615	1
54	0.0065269	1	110	0.00181	1	166	0.0052105	1
55	0.0053019	1	111	0.0021939	1	167	0.0061978	1
56	0.0020659	1	112	0.0060698	1	168	0.0034554	1
169	0.0034188	1	203	0.0034371	1	237	0.0062526	1
170	0.0048632	1	204	0.0015357	1	238	0.0058687	1
171	0.0028704	1	205	0.0040039	1	239	0.0050277	1
172	0.0061064	1	206	0.0053202	1	240	0.0042598	1
173	0.0045341	1	207	0.0033823	1	241	0.0039307	1
174	0.0040222	1	208	0.0011335	1	242	0.0039856	1
175	0.0042964	1	209	0.0026327	1	243	0.0060332	1
176	0.0048997	1	210	0.0046072	1	244	0.0047352	1
177	0.006472	1	211	0.0065634	1	245	0.0059784	1
178	0.0026875	1	212	0.0017186	1	246	0.0058138	1
179	0.0062892	1	213	0.0045158	1	247	0.0019014	1
180	0.0012066	1	214	0.0048266	1	248	0.0014078	1
181	0.0046803	1	215	0.0061612	1	249	0.0020842	1
182	0.0062709	1	216	0.0063989	1	250	0.0035102	1
183	0.0050643	1	217	0.0038576	1	251	0.0018283	1
184	0.0018648	1	218	0.0024499	1	252	0.0023767	1
185	0.0054482	1	219	0.0030897	1	253	0.0021208	1
186	0.003821	1	220	0.0025047	1	254	0.0050825	1
187	0.0034737	1	221	0.0020476	1	255	0.0057956	1
188	0.0059235	1	222	0.0023036	1	256	0.00479	1
189	0.0027607	1	223	0.0031812	1	257	0.0036931	1
190	0.0058321	1	224	0.004918	1	258	0.0025778	1
191	0.0065451	1	225	0.0057224	1	259	0.0020111	1
192	0.0029069	1	226	0.0063806	1	260	0.0016454	1
193	0.0031994	1	227	0.0061246	1	261	0.0037479	1
194	0.0022122	1	228	0.003492	1	262	0.004333	1
195	0.0014992	1	229	0.0036565	1	263	0.0027424	1
196	0.0056493	1	230	0.003364	1	264	0.0044609	1
197	0.0037296	1	231	0.0016271	1	265	0.0019562	1
198	0.0053568	1	232	0.0059053	1	266	0.0064537	1
199	0.0035651	1	233	0.0033274	1	267	0.0019928	1
200	0.0019745	1	234	0.00298	1	268	0.0041684	1
201	0.0012798	1	235	0.0043147	1	269	0.0011884	1
202	0.0013529	1	236	0.0040587	1	270	0.003949	1

Tabla A10 Datos de entrenamiento para el caso 5 en operación bajo falla

Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada	Muestra	Corriente diferencial	Salida deseada
1	0.010456	-1	56	0.030149	-1	111	0.034836	-1
2	0.030699	-1	57	0.035381	-1	112	0.013201	-1
3	0.036027	-1	58	0.011314	-1	113	0.018352	-1
4	0.011521	-1	59	0.025963	-1	114	0.027624	-1
5	0.026437	-1	60	0.013407	-1	115	0.030715	-1
6	0.013652	-1	61	0.006083	-1	116	0.029685	-1
7	0.0061941	-1	62	0.017592	-1	117	0.0090799	-1
8	0.017914	-1	63	0.0071293	-1	118	0.01217	-1
9	0.0072594	-1	64	0.012361	-1	119	0.022473	-1
10	0.012586	-1	65	0.020732	-1	120	0.0070195	-1
11	0.02111	-1	66	0.019685	-1	121	0.016291	-1
12	0.020045	-1	67	0.028056	-1	122	0.01011	-1
13	0.028568	-1	68	0.034334	-1	123	0.023503	-1
14	0.034961	-1	69	0.0092218	-1	124	0.028654	-1
15	0.0093902	-1	70	0.033288	-1	125	0.025564	-1
16	0.033896	-1	71	0.02701	-1	126	0.024533	-1
17	0.027503	-1	72	0.021778	-1	127	0.026594	-1
18	0.022176	-1	73	0.0155	-1	128	0.031745	-1
19	0.015783	-1	74	0.022824	-1	129	0.021443	-1
20	0.023241	-1	75	0.018639	-1	130	0.0080497	-1
21	0.018979	-1	76	0.036427	-1	131	0.014231	-1
22	0.037092	-1	77	0.023871	-1	132	0.032775	-1
23	0.024307	-1	78	0.024917	-1	133	0.017322	-1
24	0.025372	-1	79	0.032242	-1	134	0.033806	-1
25	0.03283	-1	80	0.016546	-1	135	0.01114	-1
26	0.016848	-1	81	0.0081756	-1	136	0.015161	-1
27	0.0083248	-1	82	0.010185	-1	137	0.03563	-1
28	0.010358	-1	83	0.029905	-1	138	0.034606	-1
29	0.030414	-1	84	0.035095	-1	139	0.013114	-1
30	0.035692	-1	85	0.011223	-1	140	0.018231	-1
31	0.011414	-1	86	0.025753	-1	141	0.027442	-1
32	0.026192	-1	87	0.013299	-1	142	0.030513	-1
33	0.013525	-1	88	0.0060338	-1	143	0.029489	-1
34	0.0061365	-1	89	0.01745	-1	144	0.0090201	-1
35	0.017747	-1	90	0.0070717	-1	145	0.01209	-1
36	0.007192	-1	91	0.012261	-1	146	0.022325	-1
37	0.012469	-1	92	0.020564	-1	147	0.0069733	-1
38	0.020914	-1	93	0.019526	-1	148	0.016184	-1
39	0.019858	-1	94	0.027829	-1	149	0.010044	-1
40	0.028303	-1	95	0.034057	-1	150	0.023348	-1
41	0.034636	-1	96	0.0091473	-1	151	0.028466	-1
42	0.009303	-1	97	0.033019	-1	152	0.025395	-1
43	0.033581	-1	98	0.026791	-1	153	0.024372	-1
44	0.027247	-1	99	0.021602	-1	154	0.026419	-1

45	0.02197	-1	100	0.015374	-1	155	0.031536	-1
46	0.015636	-1	101	0.02264	-1	156	0.021301	-1
47	0.023025	-1	102	0.018488	-1	157	0.0079967	-1
48	0.018803	-1	103	0.036133	-1	158	0.014137	-1
49	0.036748	-1	104	0.023678	-1	159	0.03256	-1
50	0.024081	-1	105	0.024716	-1	160	0.017208	-1
51	0.025136	-1	106	0.031981	-1	161	0.033583	-1
52	0.032525	-1	107	0.016412	-1	162	0.011067	-1
53	0.016692	-1	108	0.0081095	-1	163	0.015074	-1
54	0.0082475	-1	109	0.015261	-1	164	0.035426	-1
55	0.010268	-1	110	0.035866	-1	165	0.034408	-1
166	0.013039	-1	201	0.0069003	-1	236	0.031087	-1
167	0.018127	-1	202	0.016015	-1	237	0.020998	-1
168	0.027285	-1	203	0.0099383	-1	238	0.0078829	-1
169	0.030338	-1	204	0.023104	-1	239	0.013936	-1
170	0.02932	-1	205	0.028167	-1	240	0.032095	-1
171	0.0089686	-1	206	0.025129	-1	241	0.016963	-1
172	0.012021	-1	207	0.024116	-1	242	0.033104	-1
173	0.022197	-1	208	0.026142	-1	243	0.010909	-1
174	0.0069335	-1	209	0.031205	-1	244	0.014903	-1
175	0.016092	-1	210	0.021078	-1	245	0.035024	-1
176	0.0099861	-1	211	0.007913	-1	246	0.034018	-1
177	0.023215	-1	212	0.013989	-1	247	0.012891	-1
178	0.028303	-1	213	0.032218	-1	248	0.017921	-1
179	0.02525	-1	214	0.017027	-1	249	0.026976	-1
180	0.024233	-1	215	0.033231	-1	250	0.029994	-1
181	0.026268	-1	216	0.010951	-1	251	0.028988	-1
182	0.031356	-1	217	0.014945	-1	252	0.0088669	-1
183	0.02118	-1	218	0.035122	-1	253	0.011885	-1
184	0.007951	-1	219	0.034113	-1	254	0.021945	-1
185	0.014056	-1	220	0.012927	-1	255	0.0068549	-1
186	0.032373	-1	221	0.017971	-1	256	0.015909	-1
187	0.017109	-1	222	0.027051	-1	257	0.0098729	-1
188	0.033391	-1	223	0.030078	-1	258	0.022951	-1
189	0.011004	-1	224	0.029069	-1	259	0.027982	-1
190	0.015002	-1	225	0.0088917	-1	260	0.024964	-1
191	0.035256	-1	226	0.011918	-1	261	0.023957	-1
192	0.034243	-1	227	0.022007	-1	262	0.02597	-1
193	0.012976	-1	228	0.0068741	-1	263	0.031	-1
194	0.01804	-1	229	0.015954	-1	264	0.020939	-1
195	0.027155	-1	230	0.0099005	-1	265	0.0078609	-1
196	0.030193	-1	231	0.023016	-1	266	0.013897	-1
197	0.02918	-1	232	0.02806	-1	267	0.032006	-1
198	0.0089257	-1	233	0.025033	-1	268	0.016915	-1
199	0.011964	-1	234	0.024025	-1	269	0.033012	-1
200	0.022091	-1	235	0.026042	-1	270	0.010879	-1